

L'éclairage LED au service de la conservation préventive et de la muséographie

**Etude du potentiel de dommage thermochimique, du potentiel de
dommage photochimique, des conséquences sur la santé et de la qualité
de la lumière LED**

Mémoire présenté par :

Gillioz Sandra

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation
Objets archéologiques et ethnographiques
Objets scientifiques, techniques et horlogers

2010-2011

Le 29 juillet 2011

« J'atteste que ce travail est le résultat de ma propre création et qu'il n'a pas été présenté à aucun autre jury que ce soit en partie ou entièrement. J'atteste également que dans ce texte toute affirmation qui n'est pas le fruit de ma réflexion personnelle est attribuée à sa source et que tout passage recopié d'une autre source est en outre placé entre guillemets ».

Sion, le 27 juillet 2011

L'éclairage LED au service de la conservation préventive et de la muséographie

**Etude du potentiel de dommage thermochimique, du potentiel de
dommage photochimique, des conséquences sur la santé et de la qualité
de la lumière LED**

Mémoire présenté par :

Gillioz Sandra

Pour l'obtention du

Bachelor of Arts HES-SO en Conservation
Objets archéologiques et ethnographiques
Objets scientifiques, techniques et horlogers

2010-2011

Le 29 juillet 2011

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui m'ont fait profiter de leur aide et de leurs connaissances pour la rédaction de ce présent travail de diplôme.

Monsieur *Christian Cevey*, directeur du centre de conservation-restauration au sein du Laténium, qui a su m'accueillir, me renseigner et m'épauler tout au long du projet.

Monsieur *Libero Zuppiroli*, directeur et professeur de l'EPFL et du Laboratoire d'optoélectronique des matériaux moléculaires (LOOM) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), pour avoir pris le temps de m'accueillir, m'informer et clarifier certains aspects de l'éclairage LED.

Messieurs *Manuel Gulin et Patrick Dupont*, techniciens de musée au sein du musée olympique de Lausanne qui m'ont réservé un accueil chaleureux, ont pris le temps de répondre à mes nombreuses questions et m'ont autorisé à réaliser des relevés thermo-hygrométriques dans une vitrine.

Madame *Chloé Maquelin* du musée ethnographique de Neuchâtel (MEN) pour son sourire et le temps qu'elle m'a consacré entre questions et relevés thermo-hygrométriques.

Madame *Mijanou Gold*, conservatrice-restauratrice au musée de l'art brut de Lausanne, Messieurs *Frédéric Jaccaud et Marc Attalah*, respectivement conservateur en charge de collections et directeur de la Maison d'Ailleurs et Monsieur *Stéphane Kläfiger*, muséographe, pour les entretiens qu'ils m'ont accordés.

Je remercie également toutes les personnes qui forment mon noyau fort et qui m'apportent leur soutien de tous les jours, ma famille, Kévin et spécialement ma sœur Christelle, ma boussole dans la vie et en méthodologie, qui s'est consacrée aux corrections de ce travail de manière intensive. Je remercie également toutes les autres personnes qui ont contribué à la correction de ce travail, notamment Loïc qui a passé du temps à m'aider à clarifier les notions d'optoélectronique.

Enfin, merci à mes collègues, ma moitié de classe Emmanuelle, et Ingrid pour le soutien durant trois années de formation, pour les rires partagés, la découverte des pâturages jurassiens et les excursions en ski dans les montagnes valaisannes enneigées.

Sommaire

Remerciements.....	1
Sommaire	2
I. Résumé / Abstract	4
II. Introduction.....	5
III. Eclairage en muséographie	7
A. Lumière et visiteur	7
B. Lumière et scénographie	9
C. Lumière et conservation préventive	9
1. Nature de la lumière.....	10
2. Altérations thermochimiques	11
3. Altérations photochimiques	12
4. Recommandations en conservation préventive.....	14
IV. Qu'est-ce qu'une LED ?	15
A. Structure atomique et interaction entre matière et rayonnement	15
B. Diode électroluminescente	16
1. Dopage chimique	16
2. Jonction p-n	17
C. Technologies LED pour la production de lumière « blanche »	18
1. LED bleue couplée à un luminophore phosphore	18
2. LED bleue couplée à plusieurs luminophores phosphore	19
3. Diodes RGB ou RGBA	20
4. LED UV couplée avec trois luminophores RGB.....	20
D. Bénéfices de l'éclairage LED.....	21
1. Economies d'énergie	21
2. Durée de vie, maintenance	21
V. L'éclairage LED et la muséographie	22
A. Conservation	22
1. Dégradations thermochimiques	22
2. Dégradations photochimiques	26
3. Recommandations en terme d'éclairement	28
B. Conséquences sur la santé.....	29
C. Qualité de la lumière produite	30
1. Lacunes de l'éclairage LED.....	30
2. Les différentes technologies LED pour la production de lumière blanche et la qualité de la lumière émise.....	31

3. Remise en question de l'adéquation de l'IRC avec l'éclairage LED	32
D. Problèmes techniques recensés dans les musées suisses	33
VI. Bilan.....	34
VII. Conclusion.....	35
VIII. Glossaire	38
IX. Bibliographie	40
X. Table des illustrations	42
XI. Annexes	44

I. Résumé / Abstract

Depuis l'entrée en vigueur en 2009 de nouvelles législations concernant l'éclairage, la diode électroluminescente, LED, représente une nouvelle alternative pour l'éclairage des collections patrimoniales. Dans le présent travail, nous avons étudié l'adéquation entre l'éclairage LED et les impératifs requis par la conservation et la muséographie d'après quatre critères principaux : le potentiel de dommages thermochimiques, le potentiel de dommages photochimiques, les conséquences sur la santé et la qualité de la lumière produite. Pour ce faire, nous avons effectué d'une part une revue de littérature et d'autre part des relevés thermo-hygrométriques dans plusieurs vitrines de musées suisses équipées d'un éclairage LED. Du point de vue du potentiel de dommages thermochimiques, l'éclairage LED n'émet aucune émission infrarouge mais convertit une grande partie de l'énergie en chaleur à la jonction p-n. Les relevés thermo-hygrométriques ont montré que l'éclairage LED peut être une bonne alternative en matière de stabilité climatique au sein d'une vitrine d'exposition. Du point de vue du potentiel de dommages photochimiques, les LEDs n'émettent pas ou très peu de rayonnements ultraviolets mais sont susceptibles de provoquer des altérations photochimiques par le biais de la lumière visible. En ce qui concerne les conséquences sur la santé, la lumière bleue caractéristique des LEDs à haute efficacité, peut entraîner des phénomènes d'éblouissement et des effets nocifs sur la rétine. Enfin, du point de vue de la qualité de la lumière, la technologie LED comporte plusieurs désavantages qui ont pour conséquence un indice de rendu des couleurs moindre que les sources halogènes tungstène. Ce travail comprend des recommandations concernant l'éclairage LED pour la conservation préventive et la muséographie. L'éclairage LED, malgré certaines lacunes notamment au point de vue de la qualité de la lumière produite, peut être une alternative pour l'éclairage muséal sous certaines conditions.

Since the introduction of new legislations concerning lighting in 2009, the light-emitting diode, LED, has represented a new alternative to museum lighting. In this thesis, we investigated the suitability of LED lighting for the imperatives of conservation and museography according to four principal criteria : the thermochimical and photochimical damage potentials, the consequences on health and the quality of light. We evaluated LED lighting with a review of literature and with thermo-hygrometrics recordings in several showcases of Swiss museums. Concerning the thermochimical damage potential, LEDs do not emit IR but convert much of their energy into heat. The thermo-hygrometrics recordings showed that LED lighting may be an appropriate solution for the climatic stability in showcase. Concerning the photochimical damage potential, LEDs do not emit UV but may deteriorate light-sensitive materials via the visible light. Regarding the consequences on health, blue light from cold white LED can be dazzling and dangerous to the retina. Finally, concerning the quality of light, LED technology has a smaller color rendering index than tungsten halogen sources. We proposed advices on LED lighting use, as it can be a good alternative to museum lighting under certain conditions.

II. Introduction

L'*éclairage*¹ en *muséographie* évoque un domaine particulièrement riche, issu d'un ensemble de compromis pour répondre aux trois missions fondamentales du musée : étudier, conserver, exposer. Partant du constat que la *lumière* est la composante essentielle du phénomène de la vision, le musée ne peut se passer d'éclairage pour étudier et présenter ses collections.

L'éclairage dans le milieu muséal a durant longtemps été soumis à la nature variable et capricieuse de la lumière naturelle, seule possibilité d'illumination des collections jusqu'à l'apparition des sources artificielles dans les années 1930. Avec l'arrivée de ces nouvelles possibilités d'éclairage, le musée fut enfin en mesure de gérer l'illumination des objets sans se soucier de la météorologie ou du cycle du soleil et initia l'approche conflictuelle entre dégradations et contraintes visuelles². Dès cette époque, les études se sont multipliées sur l'impact de la lumière sur les matériaux photosensibles. Elles ont démontré que la lumière est composée de plusieurs ondes plus ou moins dangereuses pour la conservation des collections³. Par conséquent, éclairer c'est aussi dégrader. Simultanément un medium de communication indispensable et un agent d'altération du patrimoine matériel photosensible, l'éclairage devient alors un instrument contradictoire qui donne à voir tout en diminuant la durée de vie des collections patrimoniales.

Aujourd'hui plongés au cœur de l'écologie et de la politique de réduction de la consommation d'énergie, les gouvernements mondiaux joignent leurs efforts afin de diminuer l'impact de l'être humain sur la nature. L'éclairage fait partie intégrante des considérations, représentant une part de marché mondial de 20% de l'électricité consommée, des milliards d'euros et des millions de tonnes de CO2 par an⁴. Dans ce contexte, les sources à incandescence, considérées comme étant inefficaces énergétiquement, ont été placées en période probatoire et attendent d'être progressivement retirées du marché d'ici 2020. Les nouvelles législations en vigueur imposent le remplacement des lampes à incandescence et des lampes halogènes les plus performantes par de nouvelles lampes économiques⁵. En réponse à ces impératifs écologiques, de nouvelles possibilités d'éclairage ont fait leurs apparitions telles que les diodes électroluminescentes (LEDs)⁶. Les LEDs ne feraient pas qu'entrer en compétition avec les sources d'éclairage précédentes, elles les surpasseraient même sur plusieurs points⁷ :

¹ Tous les mots placés en *italique* sont répertoriés dans un glossaire en fin de travail, p.38.

² Association française de l'éclairage, 1991, p.13-14.

³ Bergeron et Costain, 1992, p.37.

⁴ Kitsinelis, 2011, p.1.

⁵ Ferrini, 2009, p.37.

⁶ Ou DEL en français. Dans ce travail, nous avons pris le parti d'utiliser l'abréviation anglaise car les principales ressources sur le sujet se présentent sous le terme LED.

⁷ Kitsinelis, 2011, p.125.

conversion de l'énergie sous forme de lumière de 15% - versus 5% pour les lampes à incandescence⁸ - économies d'énergie, durée de vie promise allant jusqu'à 50'000 heures, facilité d'exploitation, absence d'émission *infrarouges (IR)* et *ultraviolettes (UV)*, résistance, rendement lumineux supérieur aux sources lumineuses incandescentes et halogènes, maintenance réduite, etc. Séduisante pour ses économies d'énergie et par son absence d'émission en matière de rayonnement IR et UV, la diode électroluminescente s'est introduite jusque dans le milieu muséal.

Ce travail a été réalisé dans l'objectif d'évaluer l'adéquation de l'éclairage LED avec les impératifs de la muséographie et surtout de la conservation préventive des collections, sans se vouloir une source exhaustive de l'éclairage LED. Pour ce faire, nous avons recoupé toutes les informations à notre disposition concernant l'éclairage LED et ses caractéristiques au moyen de la littérature, des expériences de plusieurs musées suisses qui détiennent depuis récemment un éclairage LED dans leurs locaux et d'entretiens avec plusieurs spécialistes en la matière. Nous nous sommes concentrées sur quatre aspects de la LED qui peuvent porter atteinte à la conservation des collections, et à la muséographie : le potentiel de dommages thermochimiques, le potentiel de dommages photochimiques lié à la *répartition spectrale d'énergie*, les conséquences sur la santé et la qualité de la lumière produite.

Dans ce travail, nous commencerons par rappeler les fondements essentiels de la lumière en muséographie et en conservation préventive afin de redéfinir les contraintes visuelles et de conservation auxquelles doit faire face un éclairage muséographique. Puis, nous étudierons la nature et fonctionnement d'une LED pour synthétiser les propriétés et caractéristiques d'un éclairage LED. Nous identifierons ensuite les principales technologies existantes pour la production d'une lumière LED « blanche ». Enfin, nous évaluerons l'adéquation de l'éclairage LED à la muséographie en passant par la conservation, par les conséquences sur la santé et par la qualité de la lumière produite. Le bilan final nous permettra de synthétiser les points les plus importants du présent travail afin de définir des critères fondamentaux pour le choix d'un éclairage LED. Nous concluons ce rapport en discutant des aspects positifs et négatifs de l'acquisition d'un éclairage LED en l'état actuel de l'avancée technologique et des études proposées en conservation.

⁸ Sanial, 2011, p.211.

III. Eclairage en muséographie

Jusque dans les années 1950, l'éclairage des collections muséales était à l'image d'une mise en exposition basée sur le principe d'accumulation des objets. La lumière était opulente et générale, sans mise en valeur particulière d'un objet individuel. Prenant conscience que le musée n'est pas uniquement une galerie d'exposition mais aussi un lieu d'éducation, on quitta progressivement la vision totale de la salle pour la vision particulière de l'objet unique⁹. L'éclairage se mit alors au service de cette nouvelle orientation qui permet de tenir un discours thématique sur un nombre d'objets préalablement sélectionnés. Depuis quelques années, nous assistons à un bouleversement qui poursuit cette impulsion dans le monde du musée. Las de revêtir sa réputation d'institution monotone, le musée cherche à captiver d'avantage son auditoire et participe désormais à la grande « course à l'audimat » qui régit notre vingtième siècle. Son rôle est dorénavant plus complexe : il doit conserver, étudier et exposer ses collections sans toutefois anesthésier son public. C'est dans ce cadre que s'intègre l'éclairage muséal contemporain qui, comme le souligne Ezrati, « *donne à voir et donne à ressentir* »¹⁰. Prenant conscience du pouvoir de la lumière sur la mise en valeur et l'interprétation de l'objet, l'éclairage devient un artifice du discours et concrétise la scénographie du lieu. Illuminer un objet consiste dès lors, à le mettre en valeur et à lui donner un sens.

Pourtant, la lumière dans le milieu muséal est un concept en soi ambigu. A la fois condition sin et qua non de la vision et instrumentation de la muséographie, elle reste un facteur de dégradation du patrimoine. Nous sommes alors tenus de faire des compromis entre visibilité de l'objet et sa perte inéluctable de valeur. Nous devons faire dialoguer art et science¹¹ dans le but « *d'atteindre un équilibre entre les droits de notre propre génération et ceux des générations futures* »¹².

Dans ce chapitre, nous allons résumer les principaux défis auxquels doit répondre un éclairage muséographique qui s'orientent autour de trois thèmes : la lumière et le visiteur, la lumière et la scénographie, la lumière et la conservation préventive.

A. Lumière et visiteur

La lumière s'adresse à un public et représente un support de sécurité et de confort visuel du visiteur. L'éclairage dessine un parcours et place des repères spatiaux, bien pensé, il est garant d'aisance et de liberté pour le public¹³. Le confort visuel dans l'éclairage muséographique dépend de nombreux aspects complexes liés principalement au fonctionnement de l'œil – acuité, sensibilité au contraste,

⁹ Ezrati, 2002, p.25.

¹⁰ Ezrati, 2002, p.19.

¹¹ Lehalle, 1991.

¹² Michalski, 2010 [en ligne].

¹³ Courchesne, 1992, p.25.

perception des couleurs, adaptation chromatique, adaptation aux variations de luminance, accommodation - et des caractéristiques du public visé, notamment celles liées à son âge¹⁴. Il importe de comprendre chacun de ces paramètres afin de pouvoir se mettre au service de l'éclairage muséographique car, comme le souligne Sanial, « *réussir un bon éclairage, c'est satisfaire les exigences imposées par la tâche visuelle, dans le respect des contraintes liées au système visuel des utilisateurs. [...]. Méconnaître ces connaissances élémentaires dans le système visuel, c'est donc prendre un risque [...]* »¹⁵.

L'acuité est la faculté de l'œil à discerner les détails. Elle est intimement liée au niveau d'*éclairage* de la surface ou de l'objet qui doit être perçu et à la force du contraste. De manière globale, plus l'objet est éclairé et/ou plus le contraste est fort, plus nous sommes enclins à dissocier les éléments¹⁶.

La sensibilité au contraste se réfère à la capacité de distinguer un objet de son fond et importe encore d'avantage que l'acuité. On définit le contraste comme étant la différence de *luminance* entre la surface d'un objet et un fond. Plus la luminance est élevée, plus la sensibilité au contraste est élevée.¹⁷

La perception des couleurs est la propriété de l'œil qui permet de discerner la *colorimétrie* d'un objet et ses détails. On évalue le niveau d'éclairage entre 10 et 30 lux pour percevoir les couleurs d'un objet¹⁸. Plus précisément, on admet une vision acceptable des couleurs lorsque l'éclairage se situe aux alentours d'une dizaine de lux pour un matériau clair. Lorsqu'il s'agit d'un matériau sombre, l'éclairage doit avoisiner une centaine de lux. La capacité à percevoir la finesse des couleurs serait comprise entre un éclairage de 500 lux pour un objet clair et 2000 lux pour un objet sombre¹⁹.

L'adaptation aux variations de luminance se réfère à une propriété optique dont nous avons tous fait l'expérience empirique. Fixons une source lumineuse dont l'intensité est élevée, puis tournons le regard vers un milieu plus sombre ; nous sommes alors incapables de voir et distinguer clairement le lieu environnant. Après quelques secondes, l'œil s'accommode à ce changement et nous sommes à nouveau capable de deviner formes et couleurs. Le processus d'adaptation est rapide lorsque l'œil s'est accoutumé d'une ambiance sombre et se réadapte à une lumière plus intense. Au contraire, si l'œil est exposé à une forte luminosité, il a besoin de temps pour retrouver toute sa sensibilité dans un milieu plus sombre. L'adaptation de l'œil à la luminosité ambiante est un sujet critique qui doit être pris en considération dès l'entrée au musée afin d'éviter des transitions trop abruptes²⁰.

Enfin, la lumière doit être adaptée à l'âge de la clientèle. Nous savons en effet que si le système visuel est à peu près équivalent entre 6 et 40 ans, la sensibilité optique aux détails et contrastes est moindre

¹⁴ Association française de l'éclairage, 1991, p.45-47.

¹⁵ Sanial, 2007, p.68.

¹⁶ Association française de l'éclairage, 1991, p.45.

¹⁷ Association française de l'éclairage, 1991, p.46.

¹⁸ Bergeron et Costain, 1992, p.49.

¹⁹ Association française de l'éclairage, 1991, p.46.

²⁰ Deitz, 2009, p.548.

à partir de 40 ans²¹. Or, la frustration liée à un manque d'éclairage sur un objet peut s'assimiler à celle ressentie lorsque nous lisons un roman dont une page est déchirée. Une part de l'histoire est absente et porte préjudice à la lecture et compréhension globale.

B. Lumière et scénographie

Un objet patrimonial recèle de nombreuses informations : date, auteur, contexte social, économique, politique, culturel, technologique, savoir-faire, filiation, histoire personnelle, restaurations, etc. Afin d'éviter un surplus d'informations qui devient incohérent, le conservateur est contraint de faire des choix sur le discours qu'il veut porter sur ses collections. La scénographie met en scène ce discours dans l'exposition en jouant sur l'ensemble des moyens qui permettent de traduire en espace et en forme les contenus²². L'éclairage fait partie intégrante de ces moyens car il peut donner lieu à un discours sur l'objet. Lorsque la lumière est opulente, c'est l'objectivité qui prime, nous amenant à une distance critique avec les collections. Lorsque la lumière est faible, notre imagination est sollicitée, nous projetant alors dans la subjectivité²³. Par la modulation de l'éclairage, le musée module également les interprétations du public. La focalisation de la lumière sur un objet permet de le mettre particulièrement en évidence. Loin d'être un simple outil de communication, l'éclairage est ainsi un moyen puissant d'interprétation très exploité dans la muséographie actuelle.

C. Lumière et conservation préventive

Si la lumière est support de deux attentes dans la définition des rôles du musée soit étudier et exposer, elle entrave cependant à sa dernière mission souvent sous-traitée en matière de muséographie : la conservation. En effet, les réponses aux contraintes visuelles sont antagonistes aux principes de la conservation préventive des collections. Plus un objet est illuminé, plus le visiteur est capable de percevoir ses caractéristiques intrinsèques (couleurs et formes). Simultanément, plus l'objet est illuminé, plus il est susceptible d'être altéré par la lumière.

La lumière représente un facteur de vieillissement et d'altération considérable pour les matériaux dits photosensibles. Altération de la matière et comme le relève Bergeron, « *également des connaissances et des technologies souvent disparues, d'un savoir-faire particulier à chaque objet ou chaque œuvre d'art, souvent irremplaçable. L'altération ou la disparition de cette culture matérielle implique un appauvrissement de la mémoire collective, de ce qui nous caractérise ou nous individualise* »²⁴. Il ne s'agit pas uniquement de conserver un objet mais bien l'ensemble des représentations matérielles et

²¹ Courchesne, 1992, p.31.

²² Chaumier et Le villain, 2006, p.15.

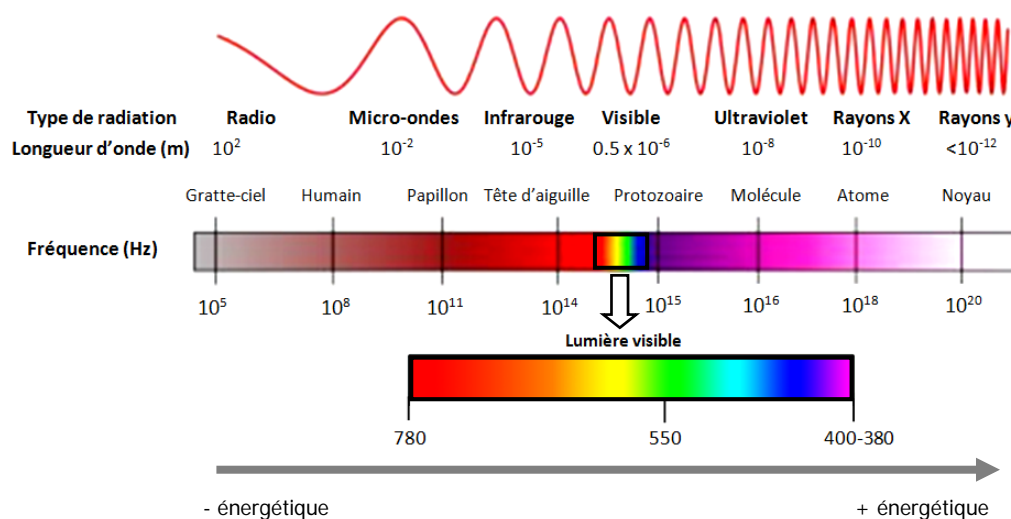
²³ Courchesne, 1992, p.24-26.

²⁴ Bergeron, 1992, p.15.

immatérielles que cet objet traduit. Afin de comprendre les réactions chimiques qui s'opèrent lors de la dégradation d'un objet par la lumière, il s'agit déjà de comprendre la nature de la lumière.

1. Nature de la lumière

La lumière est à la fois une onde et une particule. C'est la conclusion de Louis de Broglie et Albert Einstein, mettant un terme au conflit entre les partisans de la théorie ondulatoire fondée par Newton et la théorie corpusculaire élaborée par Huygens²⁵. Dans l'approche de la compréhension des phénomènes de dégradations dus à la lumière, il est nécessaire de s'intéresser au spectre électromagnétique (ill.1).



Ill. 1 Spectre électromagnétique : type de radiation, longueur d'onde (m), fréquence (Hz) ; zoom sur la lumière visible. (©HECR Gillioz, inspiré de l'illustration de Lecocq, *quarante jours un regard sur le monde* [en ligne].)

L'ensemble des rayonnements électromagnétiques composent le spectre électromagnétique en termes de fréquence, d'énergie des photons et de longueur d'onde²⁶. De manière générale, plus la longueur d'onde d'un rayonnement est courte, plus l'onde est énergétique, plus le rayonnement est pénétrant et dangereux pour un matériau. Cela est dû au fait que l'énergie est concentrée sur une plus petite distance et transporte par conséquent une plus grande charge de photons²⁷. Les ondes de forte énergie sont caractérisées par une *température de couleur* élevée : vert, bleu, violet et blanc. Les ondes moins énergétiques sont caractérisées par une température de couleur basse : jaune au rouge (ill.1).

Dans l'ensemble de ce spectre électromagnétique, l'œil ne perçoit qu'une infime partie des ondes électromagnétiques ; c'est ce que l'on appelle la lumière visible qui comprend des ondes entre 380-

²⁵ Kitsinelis, 2011, p.5.

²⁶ Technoscience, 2010 [en ligne]

²⁷ Marchand, 1997, p.319.

400 et 780 nanomètres (ill.1, p.10)²⁸. Le spectre visible recense l'ensemble des couleurs d'un arc-en-ciel, résultant de trois couleurs primaires rouge-bleu-vert. Selon le principe de *synthèse additive*, la mixité de ces trois couleurs fondamentales engendre une lumière blanche théorique²⁹.

En conservation, nous nous intéressons à deux rayonnements supplémentaires qui n'apportent en rien à la lisibilité de l'objet mais sont susceptibles de provoquer des altérations. Il s'agit de rayonnements invisibles émis par la lumière naturelle et la plupart des sources lumineuses artificielles. On les distingue suivant l'échelle de leur longueur d'onde: rayonnement ultraviolet – UV - (longueur d'onde plus petite que 400 nm environ) et rayonnement infrarouge – IR - (longueur d'onde plus grande que 700 nm environ)³⁰. Cette distinction est en lien avec la catégorie d'altérations que peuvent engendrer chacune de ces radiations : altération thermochimique ou photochimique.

2. Altérations thermochimiques

Les rayonnements IR, de longueur d'onde plus élevée que le rayonnement visible, ont un effet calorique sur la matière, localisé surtout à la surface de l'objet irradié. Ce réchauffement est susceptible de provoquer la contraction et l'assèchement des matériaux organiques, l'altération des surfaces vernissées, laquée ou cirées jusqu'à l'inflammation de matériaux comme le nitrate de cellulose³¹. Lorsque l'objet est composite, il y a une différence de température entre la surface et l'intérieur de l'objet qui provoque des contraintes mécaniques entre les différents matériaux pouvant aller jusqu'à la cassure ou la désolidarisation des matières³².

Les altérations thermochimiques peuvent également être issues d'autres sources liées à l'éclairage tels que la quantité de chaleur rejetée par les appareils qui l'accompagnent (transformateurs, alimentations, ballast) et surtout la résistance de la source lumineuse. Nous le verrons, ce dernier point joue un rôle très important dans la production de chaleur de l'éclairage LED.

L'allumage et l'extinction successive des luminaires influencent la température et le taux d'humidité relative dans un environnement car ces deux paramètres sont interconnectés et s'équilibrent l'un avec l'autre. Les variations thermo-hygrométriques sont sources de dégradations de la matière, surtout pour les matériaux contenant de l'eau, tels que les matériaux organiques. En effet, constamment à la recherche d'équilibre dans leur environnement, les matériaux poreux et hygroscopiques prennent et restituent l'humidité relative ambiante. Cette faculté induit des risques de contraction (humidité relative en dessous de 40%) et rétraction (humidité relative en dessus de 60%) allant jusqu'à provoquer des altérations mécaniques - cassure, fente, fissure, déformation, etc. Si ces variations

²⁸ Michalski, 2010 [en ligne]

²⁹ Sanial, 2007, p.97.

³⁰ Bergeron et Costain, 1992, p.40.

³¹ Association française de l'éclairage, 1991, p.37.

³² Ezrati, 2002, p.101.

ont peu d'impact au sein d'un grand volume, elles peuvent devenir importantes dans un microclimat tel qu'une vitrine d'exposition. Sachant que la stabilité climatique est la contrainte la plus influente sur la bonne conservation des matériaux, les écarts types journaliers de température inhérents à l'éclairage peuvent porter préjudice aux objets. En conservation préventive, nous essayons d'atteindre l'objectif de +/- 2° C de variation journalière de température. L'éclairage dans une enceinte fermée provoque, de manière globale, un assèchement de l'atmosphère ambiante (réduction du taux d'humidité relative)³³, conduisant à la rétraction et dessiccation des matériaux organiques³⁴. Dans le cas d'une vitrine, on conseille généralement d'éloigner toute source de chaleur de la vitrine et de placer les appareils rejetant de la chaleur dans un espace ventilé. Sachant que la chaleur monte, nous éviterons particulièrement de placer le transformateur en-dessous de la vitrine³⁵.

Dans tous les cas, l'augmentation de la température et/ou du taux d'humidité relative favorise les réactions chimiques et ainsi les réactions de photo-oxydation³⁶. On considère qu'une élévation de température de 10°C double les effets photochimiques³⁷.

3. Altérations photochimiques

La préoccupation principale concernant la lumière en conservation préventive est en relation avec l'émission de rayonnements UV et d'une portion de la lumière visible (vert, bleu, violet) dommageables pour les objets photosensibles³⁸. Il s'agit de l'impact photochimique induisant des dégradations irréversibles, principalement représenté par la photo-oxydation. Ce processus est initié par l'absorption de radiations visibles et UV de la lumière au sein des molécules. Les photons prennent une place au sein de la chaîne moléculaire des matériaux et cassent les liaisons par photolyse. Cette séparation des molécules implique la formation de radicaux libres qui peuvent se recombinaison avec d'autres molécules avoisinantes telles que l'oxygène ou la vapeur d'eau, initiant alors un cycle de réactions complexes³⁹. La lumière est souvent le facteur initiateur de dégradations qui favorise un terrain propice à d'autres attaques (humidité relative, température, microorganismes, etc.).

Les matériaux concernés par les altérations photochimiques sont essentiellement des matériaux organiques. Les rayonnements UV de courte longueur d'onde sont caractérisés, comme le soulève Ezrati, par « *une énergie du même ordre de grandeur que les énergies d'activation des molécules d'un grand nombre de matériaux organiques* »⁴⁰. Sous l'effet de la radiation ultraviolette ou d'une portion de la lumière visible comprise entre 380 à 550nm environ, un matériau organique est susceptible de

³³ Bergeron et Costain, 1992, p.48.

³⁴ Association française de l'éclairage, 1991, p.37.

³⁵ Ezrati, 2002, p.105.

³⁶ Bergeron et Costain, 1992, p.45.

³⁷ Ezrati, 2002, p.101.

³⁸ Association française de l'éclairage, 1991, p.35.

³⁹ Tétreault, 2003, p.28.

⁴⁰ Ezrati, 2002, p.100.

subir des transformations dans l'agencement de ses molécules qui entraîne des variations de chromaticité, la dégradation mécanique du matériau jusqu'à la destruction de la molécule⁴¹. De manière générale, les conservateurs-restaurateurs attribuent à la lumière visible la décoloration des matériaux et au rayonnement ultraviolet le jaunissement, le farinage, la fragilisation et la désagrégation des matériaux⁴². Le risque de dégradation photochimique de la matière est défini par plusieurs critères qui sont indissociables de la nature et sensibilité même des matériaux, de la source d'éclairage, ainsi que la dose totale d'exposition. Il importe d'étudier chacun de ces facteurs afin de déterminer le degré potentiel de dégradation, dans l'idéal, au cas par cas.

3.1 Nature et sensibilité des matériaux

Au niveau de ses caractéristiques intrinsèques, un matériau est plus ou moins sensible à la lumière suivant son facteur spectral d'absorption, sa composition chimique et son histoire⁴³. De manière globale, ce sont les liaisons entre les atomes qui définissent la sensibilité du matériau à la dégradation photochimique. Certaines molécules constitutives des matériaux absorbent très bien une radiation dont la longueur d'onde est de 500 nm tandis que d'autres n'y sont pas prédisposées⁴⁴. Parallèlement, pour certains liens chimiques, il suffit de peu d'absorption de lumière pour qu'ils soient altérés. C'est le cas par exemple des pigments, aquarelles, textiles et papier⁴⁵.

3.2 Nature de la source d'éclairage

La *répartition spectrale d'énergie* est propre à chaque type de source lumineuse – incandescente, halogène, tube à décharge, LED. La répartition spectrale d'énergie correspond à la quantité d'ondes ultraviolettes, visibles et infrarouges que la source lumineuse émet. Ce critère nous aide à déterminer le degré de danger d'un luminaire en fonction de la quantité de rayonnements UV, de lumière visible et d'IR.

3.3 L'exposition lumineuse

Les altérations photochimiques sont en lien avec le niveau d'éclairement (en lux) d'une source lumineuse. De manière globale, plus un objet photosensible est illuminé, plus il est susceptible de subir des dégradations. Au niveau d'éclairement s'ajoute la durée d'exposition à laquelle est soumis l'objet. Plus la durée est prolongée, plus l'effet de la lumière est conséquent⁴⁶. D'après la loi de Bunsen-Roscoe ou loi de réciprocité de l'action photochimique « *les altérations photochimiques sont le résultat du produit de l'éclairement avec la durée de l'exposition* »⁴⁷. Il s'agit dans le langage courant

⁴¹ Ezrati, 2002, p.100 et Tétreault, 2003, p.28.

⁴² Michalski, 2011 [en ligne]

⁴³ Association française de l'éclairage, 1991, p.35.

⁴⁴ Macleod, 1975, p. 9.

⁴⁵ Bergeron et Costain, 1992, p.45.

⁴⁶ Ezrati, 2002, p.101.

⁴⁷ Bergeron et Costain, 1992, p.50.

de la *dose totale d'éclairement*, ou DTE. Cette notion met en évidence qu'un éclairage de 50 lux durant 1'000 heures provoque les mêmes conséquences qu'un éclairage de 5'000 lux durant 10 heures puisque l'effet de la lumière est cumulatif.

4. Recommandations en conservation préventive

C'est à l'apparition des sources d'éclairage artificielles, dans les années 1930, qu'on doit les premières études en conservation sur l'impact photochimique de la lumière. Les recherches ont montré qu'en diminuant le niveau d'éclairement, on peut également diminuer le nombre de photons par seconde qui touchent la surface du matériau photosensible. Cela permet de réduire l'impact de la lumière sans pour autant pouvoir l'empêcher complètement⁴⁸. Les préconisations émises en termes d'éclairement ont concilié dès le départ la visibilité de l'objet à sa sensibilité intrinsèque à la lumière⁴⁹. De ce fait, il y a eu un compromis initial qui ne précise guère une norme idéale mais bien un minimum acceptable en termes de contraintes visuelles. Les normes concernant les matériaux jugés comme étant les plus sensibles à la lumière se sont basées sur l'appréciation du niveau minimum d'éclairement pour discerner les contenus fixé entre 10 et 30 lux. Pour ces matériaux très sensibles à la lumière, on préconisait alors un niveau d'éclairement maximal de 50 lux. Deux autres catégories ont été ajoutées à l'étude : « objets sensibles » pour lesquels on a fixé un niveau maximal d'éclairement de 150 lux et « objets peu sensibles » pour lesquels on a accepté un niveau d'éclairement de 300 lux⁵⁰. Avec plusieurs années de recul il apparaît que nous avons tendance à soustraire le mot *maximum* de ces normes. Au regard des visites inter-musées que nous avons effectué durant un mois, nous ré-insistons sur l'importance de replacer ce terme dans nos esprits.

Au fil des années ces normes se sont affinées jusqu'à la création de 6 catégories regroupées sous : « insensible », « sensible », « très sensible », « fortement sensible », « très fortement sensible », « extrêmement sensible ». Dès lors, les recherches ont inséré la notion de DTE aux normes. Il s'agissait de retranscrire concrètement des chiffres tangibles en tenant compte de l'action cumulative de la lumière (cf. annexes, ill.9, p.44). Une seconde norme est à considérer: la dose minimale avec effet nuisible observable, DMENO. Ce concept s'appuie sur un objectif de préservation de 10, 100, 1000 ans pour trois catégories de sensibilité à la lumière : forte sensibilité, sensibilité moyenne et faible sensibilité (cf. annexes, ill.10-11, p.44-45).

En matière de rayonnement invisible, les conservateurs-restaurateurs se sont mis d'accord sur la réduction maximale de tout rayonnement UV et IR. Pour ce faire, on recommande d'utiliser des filtres UV et IR pour toute source lumineuse émettant dans ces fréquences d'onde. On estime un niveau acceptable de rayonnement ultraviolet en-dessous de 75 $\mu\text{W}/\text{lm}^{51}$.

⁴⁸ Macleod, 1975, p.9.

⁴⁹ Bergeron et Costain, 1992, p.37.

⁵⁰ Bergeron et Costain, 1992, p.49.

⁵¹ Notes de l'ICC 2/1, 1994.

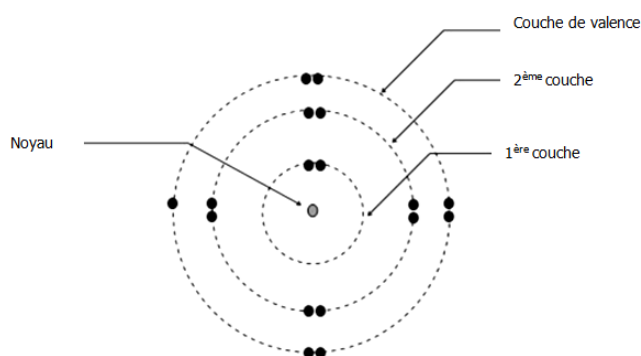
IV. Qu'est-ce qu'une LED ?

Avant d'aborder la question de la constitution et du fonctionnement d'une diode électroluminescente, il importe de comprendre les interactions qui s'opèrent entre matière et rayonnement, à la base de toute émission de lumière par une source artificielle.

A. Structure atomique et interaction entre matière et rayonnement

Un atome, issu de la terminologie latine *atomos* – qu'on ne peut diviser – est le constituant élémentaire de la matière qui comporte des particules fondamentales : proton, neutrons et électrons⁵². Selon la théorie de Bohr, les atomes s'organisent de manière planétaire avec un noyau au centre et des électrons qui gravitent en orbite autour de lui (ill.2). Chaque atome est unique, défini par un nombre de particules chargées positivement – les protons – et un nombre équivalent de particules chargées négativement – les électrons - afin que la charge nette de l'atome soit nulle. La dernière particule élémentaire est nommée neutrons, une particule non-chargée. Les protons et les neutrons sont répartis dans le noyau de l'atome⁵³.

Les électrons sont au cœur des interactions entre matière et rayonnement, émission et absorption. Ils sont organisés sur les différentes couches selon la configuration électronique des atomes de manière fondamentale. Chacune des couches a une énergie propre et admet un nombre maximal d'électrons. La couche la plus éloignée du noyau est appelée couche de valence (ill.2). A l'exception de cette dernière couche, toutes les orbites d'un atome doivent



III. 2 Modèle atomique de Bohr : noyau, organisation des électrons sur les couches électroniques
(© atome structure [en ligne])

impérativement être remplies. Les électrons de valence sont plus énergétiques mais moins fortement liés à l'atome que ceux situés à proximité du noyau. Cela est relatif à la réduction de l'attraction entre charges positives du noyau et charges négatives des électrons à mesure que l'on s'éloigne du noyau⁵⁴.

L'élévation de la température ou le passage d'un courant électrique à travers ces atomes a pour effet leur excitation. L'électron, cherchant à retrouver son état stable, « chute » d'une orbite extérieure à une orbite intérieure – de plus faible énergie. Il se retrouve alors avec un surplus d'énergie. C'est là, la

⁵² Merlet et Bérès, 2003, p.95.

⁵³ Ecole des métiers du Valais, 2010, p.3.

⁵⁴ Ecole des métiers du Valais, 2010, p.4

naissance de lumière. Afin de compenser le surplus d'énergie créé par son passage d'une couche à une autre, l'électron émet, en réintégrant sa position d'origine, un photon⁵⁵. Cette particule, à la base de l'onde électromagnétique, véhicule la lumière⁵⁶. Le niveau d'énergie du photon conditionne la couleur de la lumière émise.

B. Diode électroluminescente

Une LED est un composant *optoélectronique* qui émet des radiations lumineuses lorsqu'il est parcouru par un courant électrique⁵⁷. Le terme LED fait référence à deux notions essentielles qui déterminent son fonctionnement: la diode et l'électroluminescence. Une diode est un composant électronique polarisé, composé d'une *anode* et d'une *cathode*, qui ne peut être traversé par un courant électrique que dans un sens: de l'anode à la cathode⁵⁸. L'électroluminescence est la capacité d'un corps solide à émettre de la lumière lorsqu'il est traversé par un courant ou champ électrique⁵⁹.

Une LED est composée d'un matériau *semi-conducteur* qui possède des propriétés électriques se situant entre celles d'un isolant – constitué de plusieurs éléments et dont les électrons de valence sont solidement attachés à l'atome (silicium, germanium, carbone) – et d'un conducteur – constitué d'un seul élément et qui possède plusieurs électrons libres (cuivre, argent, or, aluminium). Un semi-conducteur possède généralement des atomes à quatre électrons de valence comme le silicium, le germanium ou le carbone⁶⁰. De manière générale, on différencie les diodes électroluminescentes de faible puissance - <0.5 ou 1 Watt – et les diodes électroluminescentes de haute puissance - >0.5 ou 1 Watt⁶¹ -. Dans ce travail, nous nous concentrerons sur l'étude des LEDs de haute puissance qui représente le cœur de l'éclairage LED.

1. Dopage chimique

Un matériau semi-conducteur à l'état brut ne représente que peu d'intérêt car le nombre d'électrons libres dans la bande de conduction et de trous⁶² dans la bande de valence est limité⁶³. Pour amplifier ses performances, on procède alors à ce qu'on appelle le « dopage chimique ». Il s'agit alors d'ajouter des impuretés dans le cristal intrinsèque afin d'augmenter le nombre de porteurs de courant. Cette opération a pour objectif d'améliorer la conductibilité du matériau en utilisant des semi-conducteurs de type n (négatif, surplus d'électrons, se référant à la cathode) ou p (positif, déficit d'électrons, se

⁵⁵ Ezrati, 2002, p.35.

⁵⁶ Held, 2009, p.28.

⁵⁷ Merlet et Bérès, 2003, p.336.

⁵⁸ Kitsinelis, 2011, p.127.

⁵⁹ Kitsinelis, 2011, p.126.

⁶⁰ Ecole des métiers du Valais, p.6.

⁶¹ Sanial, 2011, p.199.

⁶² *Un trou symbolise la carence d'un électron.*

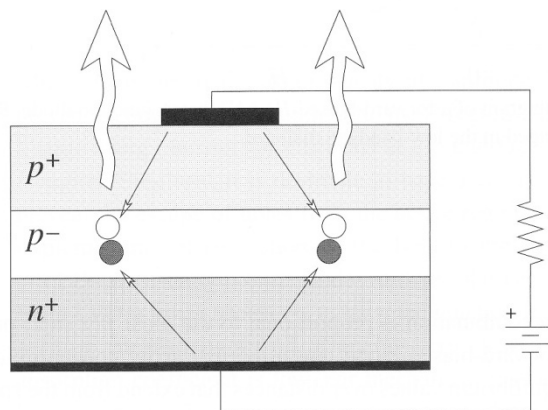
⁶³ Ecole des métiers du Valais, 2010, p.8.

référant à l'anode)⁶⁴. Lorsque le dopage consiste à ajouter des atomes d'impuretés dont le nombre d'électrons de valence est supérieur à celui du semi-conducteur, le semi-conducteur est nommé n-type⁶⁵. Ces atomes d'impuretés sont le plus souvent pentavalents – avec 5 électrons de valence – et possèdent 1 électron en surplus. Les matériaux couramment utilisés dans le dopage de type n sont l'arsenic (As), le phosphore (P), le bismuth (Bi) et l'antimoine (Sb). Le dopage de type n comble tous les trous de la couche de valence du semi-conducteur et conserve un électron libre. Puisque l'atome pentavalent a la particularité de céder un électron, on dit qu'il est « donneur ». Dans un matériau de type n, les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires⁶⁶.

Au contraire, lorsque l'opération consiste à ajouter des atomes d'impuretés dont le nombre d'électrons de valence est inférieur à celui du semi-conducteur, le semi-conducteur est appelé p-type. Il s'agit le plus fréquemment d'atomes trivalents - avec 3 électrons – auxquels manque 1 électron tels que l'aluminium (Al), le bore (B) et le gallium (Ga). Puisque dans un matériau de type p, le nombre d'électrons n'est pas suffisant pour combler tous les trous du semi-conducteur, on dit qu'il est « receveur ». Dans ce cas de figure, les électrons sont des porteurs minoritaires et les trous des porteurs majoritaires⁶⁷.

2. Jonction p-n

La diode électroluminescente fonctionne sur le principe de la jonction p-n. Lorsqu'il y a connexion entre le type p et le type n, les électrons en surplus dans la couche n remplissent les trous de la couche p, c'est ce qu'on appelle la « recombinaison »⁶⁸. Ce processus met en évidence la tendance des électrons à relâcher de l'énergie en comblant les trous de la bande de valence⁶⁹, donnant naissance au photon et à la lumière dans une LED⁷⁰. Il s'agit d'une conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse optique⁷¹.



III. 3 Processus de recombinaison et naissance du photon au sein d'une LED (©Pulfrey, 2010, p.139.)

⁶⁴ Held, 2009, p.2

⁶⁵ Kitsinelis, 2011, p.126.

⁶⁶ Ecole des métiers du Valais, 2010, p.7-8.

⁶⁷ Ecole des métiers du Valais, 2010, p.9.

⁶⁸ Sanial, 2011, p.196.

⁶⁹ Pulfrey, 2010, p.37.

⁷⁰ Kasap, 2001, p.139.

⁷¹ Pulfrey, 2010, p.138.

C. Technologies LED pour la production de lumière « blanche »

Nous allons à présent passer en revue les différentes possibilités de production de lumière dite « blanche » pour les applications d'affichage et éclairage LED. Nous insistons sur la différenciation à faire entre la lumière blanche de la lumière du jour et la lumière « blanche » réalisée à l'aide de ces différentes technologies. En effet, la lumière du jour mixe l'ensemble des ondes électromagnétiques comprises dans le spectre visible et présente par conséquent d'excellentes qualités de rendu des couleurs⁷². Le terme « lumière du jour » désigne alors un spectre continu *équiénergétique* avec une légère surabondance de courte longueur d'onde. Ce spectre lisse fait office de référence en matière de qualité pour notre œil avec un *indice de rendu des couleurs (IRC)* de 100⁷³.

De manière artificielle, il est possible de réaliser une lumière dite « blanche » de différentes manières et de plus ou moins bonne qualité : deux couleurs mixées, trois couleurs mixées, quatre, cinq, jusqu'à la palette de l'arc-en-ciel. Ceci est dû à la sensibilité des trois types de cônes que comprend notre œil aux trois couleurs primaires rouge, vert, bleu (RGB en anglais). Selon le principe de synthèse additive, la combinaison de ces trois couleurs est perçue par notre système visuel comme étant une lumière blanche⁷⁴. Plus la lumière comprend de nuances dans les couleurs RGB, plus la qualité de cette lumière augmente de manière significative. Selon le choix du semi-conducteur et la nature et quantité des dopants, les fabricants obtiennent différentes températures de couleur dans la lumière blanche⁷⁵.

De manière globale, nous distinguons trois types de lumière blanche : lumière blanche de *température de couleur* élevée (> 5'300 K) dite froide, lumière blanche neutre avec une température de couleur comprise entre 5'300 K et 3'300 K, et lumière blanche de température de couleur basse (< 3'300 K), dite « chaude ». La lumière blanche froide nous apparaît bleutée car l'équilibre des couleurs est balancé vers le bleu. Dans la lumière blanche chaude ou neutre, nous avons l'impression d'une lumière dorée ou rosée avec un déséquilibre vers les tons chauds⁷⁶.

Quatre technologies principales pour parvenir à une lumière dite « blanche » LED sont recensées sur le marché actuel et décrites ci-dessous:

1. LED bleue couplée à un luminophore phosphore

Il s'agit de la méthode la plus courante et la moins onéreuse sur le marché de l'éclairage LED⁷⁷. Le principe repose sur la combinaison de deux photons de longueur d'onde complémentaire qui

⁷² Courchesne, 1992, p.29.

⁷³ Sanial, 2011, p.19.

⁷⁴ Pulfrey, 2010, p.147.

⁷⁵ Held, 2009, p.8.

⁷⁶ Viénot, 2008, p.208 et 213.

⁷⁷ Held, 2009, p.50.

provoquent une sensation de lumière blanche dans l'œil humain⁷⁸. Ce procédé est appelé *wavelength conversion*⁷⁹. On utilise un luminophore phosphore (YAG-Ce) juxtaposé à une diode bleue (InGaN) de courte longueur d'onde. L'utilisation du phosphore au lieu d'une diode jaune n'est pas anodine. Le phosphore émet à large spectre alors que la diode émet une lumière monochromatique. Le couplage de deux diodes monochromatiques aurait pour conséquence un IRC désastreux. Le phosphore à large spectre permet d'augmenter cet indice⁸⁰. Lorsque le phosphore est excité par la radiation bleue, il absorbe certains photons de courte longueur d'onde et les convertit en une émission jaune, dont la longueur d'onde est plus élevée. La combinaison de la lumière LED bleue avec le jaune issu de la phosphorescence impressionne l'œil et donne la sensation d'une lumière blanche⁸¹. Cette technologie ne permet d'obtenir que des lumières « blanches » dites « froides », saturées en lumière bleue, vers 5'500 K⁸².

2. LED bleue couplée à plusieurs luminophores phosphore

Afin d'obtenir une plus grande variété dans la gamme de température de couleur de la méthode précédente, il est possible de rajouter un second phosphore qui permet d'atteindre un plus large panel de couleurs dans le spectre visible. Ce procédé a pour but d'augmenter le rendu des couleurs de la source artificielle en parant aux lacunes chromatiques apparaissant dans le spectre visible. Il est également possible d'ajouter plusieurs luminophores pour augmenter encore les qualités de l'éclairage. A titre d'exemple, LUMILED a développé un procédé combinant deux phosphores jaune et rouge avec le semi-conducteur menant à un IRC jusqu'à 94⁸³. Cette technologie requiert cependant des moyens financiers plus conséquents. Elle est réservée à des applications spécifiques qui nécessitent un IRC plus élevé, comme la muséographie.

La méthode de *wavelength conversion* possède cependant des désavantages⁸⁴ :

- Le comportement de l'émission de lumière d'un phosphore et d'une diode est différent. Si le phosphore a pour caractéristique une émission diffuse, la diode se comporte de manière unidirectionnelle. Le mélange de ces deux composants a pour conséquence un effet de halo qui peut être perturbant.
- Le procédé d'absorption des photons bleus par le phosphore est complexe et difficile.
- En tentant d'améliorer l'IRC, la méthode qui couple une LED bleue à plusieurs luminophores a pour conséquence une moindre efficacité lumineuse.

⁷⁸ Zissis, 2008, p.37.

⁷⁹ Held, 2009, p.50.

⁸⁰ Zissis, 2009, p.38.

⁸¹ Massol, 2010 [en ligne]

⁸² Zissis, 2008, p.38.

⁸³ Massol, 2010 [en ligne]

⁸⁴ Zissis, 2008, p.39.

3. Diodes RGB ou RGBA

Les LEDs trichromes RGB fonctionnent sur le principe de la synthèse additive. En mélangeant une diode rouge, une diode verte et une diode bleue, on obtient une impression de lumière blanche. La température de couleur de la source lumineuse dépend alors de la proportion de chacune des couleurs primaires⁸⁵. Le faible rendement de la diode verte a pour conséquence de limiter l'efficacité des diodes RGB. La technologie RGB a pour désavantage un rendu des couleurs médiocre (<60)⁸⁶.

Afin d'optimiser le rendu des couleurs, on mixe d'avantage de LEDs qui ajoutent des nuances dans la chromaticité de la lumière. L'assemblage de diodes RGB couplées à une diode ambre (RGBA) a pour conséquences la réduction des lacunes chromatiques des diodes RGB. Une lumière mixée avec plusieurs types de diodes (blanches et de couleurs) peut engendrer un rendu des couleurs excellent. Le problème majeur de ce procédé réside dans les différences de stabilité à la température et dans la durée de chacune des diodes utilisées pour le mixage de la lumière⁸⁷. Ce procédé implique un investissement financier onéreux, réservé à des applications qui nécessitent un IRC élevé comme la muséographie.

4. LED UV couplée avec trois luminophores RGB

Cette méthode imite le principe des lampes fluorescentes. En combinant une diode UV ou proche de l'UV avec trois phosphores RGB de longueur d'onde plus élevée, la lumière UV est transformée en lumière visible. L'émission UV est utilisée pour exciter les trois phosphores qui en se combinant, permettent d'obtenir un spectre riche en lumière visible⁸⁸. Son avantage principal est la création d'une lumière blanche qu'on considère de qualité avec un bon IRC (90 à 95). Cependant, cette technologie a pour désavantage des difficultés de mise en œuvre qui impliquent des coûts et performances élevés. Plusieurs conditions sont fondamentales pour l'élaboration de cet éclairage LED: la résistance du boîtier aux dégradations photochimiques induites par l'utilisation d'une diode UV et la qualité du packaging de la LED pour éviter de soumettre les utilisateurs à des radiations UV⁸⁹. Pour les perspectives d'avenir, cette méthode va devoir s'améliorer. En effet, pour réussir le pari d'élaborer un éclairage LED avec 200 lm/W, les fabricants ont besoin d'avoir à disposition des diodes UV ayant une efficacité totale de 70%⁹⁰.

⁸⁵ Zissis, 2008, p.39.

⁸⁶ Viénot, 2008, p.221.

⁸⁷ Viénot, 2008, p.222.

⁸⁸ Held, 2009, p.50.

⁸⁹ Massol, 2010 [en ligne]

⁹⁰ Zissis, 2008, p.39.

D. Bénéfices de l'éclairage LED

1. Economies d'énergie

Il s'agit là du point fort des LEDs de haute puissance. Cet aspect est intimement lié à l'efficacité lumineuse des sources LED qui dépassent largement celles des sources dites « standards ». Les progrès en la matière ne cessent d'évoluer. A l'heure actuelle, les LEDs blanches atteignent des efficacités entre 20 et 130lm/W⁹¹ même si l'objectif des chercheurs américains il y a 3 ans était de pouvoir mettre sur le marché des LEDs de haute puissance avec une efficacité de 200 lm/W pour 2011⁹².

2. Durée de vie, maintenance

La durée de vie d'une source lumineuse est évaluée selon sa dépréciation en lumen. Il s'agit de la diminution du rendement en lumen au fil des heures de fonctionnement. Les résultats d'une recherche sur ce seuil ont démontré que la majorité des occupants d'un espace est incommodée par une diminution du rendement en lumen aux alentours de 30% pour un éclairage général. L'Alliance for Solid State Illumination Systems and Technologies (ASSIST) a dès lors déterminé la limite de cette dépréciation comme se situant à 70% du rendement en lumen initial d'une source LED pour un éclairage général. Les producteurs de LED basent leur communication sur des durées de vie extrêmement élevées, allant jusqu'à nous promettre 100'000 heures de fonctionnement. Il est nécessaire de préciser que ces tests d'estimation de la durée de vie des LEDs sont basés sur une extrapolation ainsi que sur la base de test en laboratoires qui profitent de conditions environnementales idéales et difficilement reproductibles en cas réel. Le département de l'énergie U.S relève que la majorité des fabricants estiment une durée de vie aux environs de 30'000 heures pour un niveau de 70% du rendement initial en lumen sous les conditions suivantes : un courant de 350 milliampères, le maintien d'un courant constant et une température de jonction au maximum de 90°C⁹³. Selon Sanial « *cette température est toujours dépassée dans des conditions normales de fonctionnement* »⁹⁴. La durée de vie d'une diode électroluminescente est particulièrement conditionnée par la chaleur générée à la jonction p-n car la LED est extrêmement sensible à la température. La chaleur peut être variable en fonction du courant et de la tension utilisés, de la température environnante et du système de dissipation de la chaleur sur la LED. Plus la température est basse, plus la durée de vie de la LED est optimisée⁹⁵. La durée de vie d'une LED est également liée à son alimentation en courant continu. Ce dernier point ne doit en aucun cas être sous-estimé dans l'intérêt de la durée de vie d'une LED. A titre d'exemple, l'un des musées consulté durant ce

⁹¹ Kitsinelis, 2011, p.151.

⁹² Zisis, 2008, p.37.

⁹³ Energy efficiency and renewable energy, 2009 [en ligne]

⁹⁴ Sanial, 2011, p.219.

⁹⁵ Energy efficiency and renewable energy, 2009 [en ligne]

travail a alimenté un éclairage LED en courant alternatif au lieu d'un courant continu. Cette négligence a eu pour conséquence une surchauffe et un vieillissement précoce des LEDs. L'éclairage est arrivé en fin de vie après seulement trois années d'exploitation. Il s'agissait là non d'une erreur mais d'un manque de financement pour acquérir de nouvelles alimentations AC/DC afin de remplacer les transformateurs.

La durée de vie à la hausse de l'éclairage LED ravit les techniciens de musée car la maintenance est réduite de manière considérable. Cela implique des réductions de budgets d'une part pour le remplacement des ampoules - en terme de prix des ampoules et de tarif horaire des technicien – mais également une diminution des perturbations durant les heures de visite du musée. Les LEDs font preuve d'autres avantages tels qu'une modulation aisée de la lumière, un allumage instantané de l'ordre de la micro seconde, une grande résistance aux chocs et la possibilité d'être recyclés.

V. L'éclairage LED et la muséographie

L'illumination des objets, puisqu'elle est à l'encontre du bon sens en conservation, n'est pertinente qu'à condition qu'elle soit en adéquation avec un pari muséographique. C'est pourquoi, nous avons choisi de prendre le parti d'une évaluation globale de l'éclairage LED et non de nous restreindre au domaine de la conservation. Dans ce chapitre, nous étayerons notre argumentation sur plusieurs critères indissociables d'un éclairage muséographique : la conservation des collections, les questions de santé associées à l'éclairage LED et la qualité de la lumière produite.

A. Conservation

1. Dégradations thermochimiques

Durant nos entretiens avec les musées ou les fournisseurs, nous avons souvent pu entendre que les LEDs ne produisaient aucune chaleur. Cette rumeur est parfaitement erronée comme l'illustre le tableau ci-dessous (ill.4) :

	Incandescent (%)	Fluorescent (%)	Metal Halide (%)	LEDs (%)
Visible light	10	20	30	15-25
IR	70	40	15	~ 0
UV	0	0	20	0
Emitted energy	80	60	65	15-25
Heat	20	40	35	75-85
Total	100	100	100	100

III. 4 Répartition de l'énergie pour différentes sources lumineuses (©Kitsinelis, 2011, p.144)

Il est fondamental de bien distinguer émission infrarouge et chaleur produite par la résistance de la source lumineuse. S'il est vrai que la LED n'émet aucun rayonnement infrarouge, elle transforme

cependant 75 à 85% de son énergie en chaleur pure produite à la jonction p-n, à l'arrière de la diode (ill.4, p.22). Afin de parer à ce problème, les LEDs doivent impérativement être équipées d'un dispositif de dissipation de chaleur. La plupart du temps, la dissipation de chaleur est un moyen passif, incarné par des ailettes ou radiateurs. Les fournisseurs savent que l'évacuation de la chaleur est la condition sine qua non de la durée de vie des LEDs. Il s'agit même du principal défi sur le marché de l'éclairage LED afin de pouvoir augmenter la puissance des diodes sans diminuer leur pérennité. C'est pourquoi, de manière générale, ces impératifs sont respectés.

Sachant que la valeur (en ohm) de la résistance d'une source lumineuse ne varie que très faiblement, c'est l'intensité du courant électrique (en watt) qui joue un facteur déterminant dans les questions de production de chaleur. Plus le courant est élevé, plus l'intensité lumineuse est élevée, plus la quantité de chaleur émise par le composant est élevée. Les fiches techniques des LEDs (datasheets) sont prévues à cet effet : elles signalent une valeur préconisée de courant (en W) - en lien avec la durée de vie exprimée - et un courant maximum supporté. Lorsque la diode est traversée par un courant dont la valeur est plus élevée que celle préconisée, le système de dissipation de chaleur peut être dépassé. Dans une enceinte fermée, il importe de tenir compte de ces propriétés car une augmentation de courant implique une augmentation de température.

Les questions inhérentes à la dissipation de chaleur de l'éclairage LED nous ont conduites à effectuer des relevés thermo-hygrométriques dans des vitrines tests de musées suisses. Nous avons décidé de travailler plus particulièrement avec le musée ethnographique de Neuchâtel (MEN), le musée olympique de Lausanne, et le Laténium à Neuchâtel. Nous avons choisi de travailler sur deux aspects : la variation journalière de température entre allumage et extinction de l'éclairage LED dans une vitrine et la comparaison en matière de climat entre un éclairage à fibre optiques et un éclairage LED dans une même vitrine.

1.1 Variation journalière de température entre allumage et extinction de l'éclairage LED dans une vitrine d'exposition

Nous avons posé deux capteurs ElproLog® dans deux vitrines du MEN, sans contrôle d'ambiance et équipées d'un éclairage LED du 19.05.11 au 26.05.11. Les capteurs ont été programmés sur un pas d'enregistrements de 5 minutes. La première vitrine testée faisait partie de l'exposition « Angola » et était équipée d'un éclairage barrette aluminium à diodes, installé sur un côté de la vitrine. La seconde vitrine était localisée dans l'exposition « Bruits », illuminée par un éclairage à spots LED installés sur des rails (cf. annexes, ill.12-14 p.45-46). Les jours désignés pour mettre en place et retirer les capteurs – soit le 19.05.11 et le 26.05.11 ont été supprimés des statistiques afin de garder uniquement les enregistrements sans perturbation de notre part sur le climat.

En ce qui concerne la vitrine « Angola », les statistiques élaborées ont montré des variations journalières de température maximum de 4.7°C et minimum de 0.8°C, pour une moyenne de variation de 3.4°C (cf. annexes, ill. 14-17, p.47, 48). Les statistiques de la vitrine « Bruits » ont montré des valeurs moindres avec une variation journalière de température maximum de 2.8°C, minimum de 2.3°C et une moyenne de 2.5°C (cf. annexes, ill. 18-20, p.48, 49). Les écarts journaliers de température plus élevés qui concernent la vitrine « Angola » peuvent être reliés à trois facteurs : la qualité du système de dissipation de l'éclairage LED, l'intensité du courant utilisé et le manque de renouvellement d'air dans la vitrine d'exposition. D'une part, les barrettes aluminium LED installées dans les vitrines « Angola » proviennent de la grande distribution et ne sont pas de bonne qualité selon le personnel de musée. Pour l'exposition « Bruits », le MEN a consenti un plus grand investissement pour se procurer des éclairages LED de meilleure qualité. D'autre part, la vitrine d'exposition sans contrôle d'ambiance a démontré par le passé une insuffisance du renouvellement d'air. Le MEN a relevé, lors de l'installation de l'éclairage LED en 2007, une augmentation de température atteignant des valeurs de 40°C dans les vitrines de l'exposition « Angola ». En inspectant les vitrines, le personnel de musée s'est rendu compte que les barrettes LED étaient brûlantes. Cette augmentation de température était inhérente à une absence d'aération dans les vitrines. Le problème a été résolu en créant des ouvertures dans les vitrines d'exposition afin de pouvoir laisser la chaleur se dissiper à l'extérieur de l'enceinte. Pour les deux vitrines, le musée ne comprend pas de système de régulation climatique (ventilation ou climatisation). Les sources lumineuses extérieures aux vitrines peuvent influencer le microclimat des vitrines d'exposition puisque l'allumage et extinction des éclairages s'effectue de manière simultanée. L'impact climatique des sources lumineuses intérieures et extérieures aux deux vitrines sont ainsi confondues et difficiles à dissocier.

Nous avons parallèlement installé un capteur ElproLog® dans une vitrine sans contrôle d'ambiance du musée olympique de Lausanne. Cette vitrine était équipée d'une barrette aluminium à diodes installée également sur un côté de la vitrine. Les enregistrements ont été effectués du 24.05.11 au 16.06.11 programmés sur un pas d'enregistrements de 5 minutes. De même, les jours désignés pour mettre en place et retirer les capteurs – soit le 24.05.11 et le 16.06.11 ont été supprimés des statistiques afin de garder uniquement les enregistrements sans perturbation de notre part sur le climat. Les résultats démontrent une variation journalière de température maximale de 1.2°C, moyenne de 0.5°C et minimum de 0.1°C (cf. annexes, ill.21-23, p.50, 51). La diminution des écarts journaliers de température en comparaison avec ceux du MEN peut être reliée à plusieurs facteurs : une meilleure qualité du système de dissipation des barrettes aluminium LED, un volume plus grand de la vitrine d'exposition, l'intensité du courant réduite, un renouvellement d'air suffisant et la présence d'un système de régulation du climat au sein du musée. Ces résultats sont tout à fait encourageants au niveau de la stabilité climatique préconisée pour la conservation des collections.

1.2 Comparaison en matière de climat entre un éclairage à fibre optiques et un éclairage LED dans une même vitrine.

La différence des valeurs enregistrées dans les écarts journaliers de température des deux vitrines du MEN et d'une vitrine du musée olympique de Lausanne est difficile à interpréter. Afin de parer à des influences extérieures sur les résultats, nous avons procédé à une comparaison entre un éclairage avec fibres optiques et un éclairage LED au sein d'une même vitrine avec contrôle passif de l'humidité relative (cf. annexes, ill.24-25, p.51.). Le Laténium détenait des relevés thermo-hygrométriques exploitables concernant plusieurs vitrines d'exposition illuminées par un éclairage à fibres optiques, puis éclairées par des barrettes à diodes durant la même saison (avril-mai 2010/2011). Les données étant cryptées pour le programme d'exploitation, nous n'avons malheureusement pas pu les extraire sous forme de chiffres tangibles. Nous avons alors utilisé les statistiques journalières du programme Signatrol SL400 Data Logger® afin de définir la valeur maximum, minimum et la moyenne de la température journalière dans cinq vitrines d'exposition de la salle « lacustre » : « du tronc à la poutre », « bois de cerf et os », « préparation des textiles » et « vannerie » lorsqu'elles étaient illuminées avec un éclairage à fibres optiques et ensuite avec un éclairage LED.

De manière globale, les résultats ont montré que les variations journalières de températures étaient moins élevées avec un éclairage LED (moyenne entre 1.7 et 0.8) qu'avec un éclairage à fibres optiques (moyenne entre 2.2 et 2.4). Si l'écart journalier moyen de température de l'éclairage avec fibres optiques se situait globalement au-dessus de 2°C, il se situe en dessous de ce seuil avec l'utilisation d'un éclairage LED (cf. annexes, ill.26-29, p.52.). A titre d'exemple, pour la vitrine d'exposition « Du tronc à la poutre » illuminée avec un éclairage à fibres optiques, seules 13 écarts type de température sur 61 calculés peuvent prétendre à une variation journalière de température \leq à 2°C. Pour cette même vitrine illuminée avec un éclairage LED, 55 écarts type de température sur 59 calculés atteignent une variation journalière de température \leq à 2°C. Ces résultats peuvent être la conséquence de deux facteurs : la réduction d'émission infrarouge et /ou la réduction de la chaleur produite par les appareils accompagnants les éclairages. En effet, selon les informations de Christian Cevey, le transformateur de l'éclairage à fibres optiques, localisé contre la paroi d'ouverture de la vitrine, produisait une chaleur conséquente qui pouvait influencer la température dans la vitrine d'exposition (cf. annexes, ill.30 p.53.). Ce problème a été résolu en utilisant les LEDs pour l'éclairage des vitrines.

En matière d'éclairage intérieur de la vitrine, la LED semble être une bonne alternative car elle n'émet pas d'émission infrarouge et peut prétendre à des faibles variations journalières de température (<2 °C). Nous veillerons cependant à placer les transformateurs à l'extérieur de la vitrine et à nous assurer de la qualité du système de dissipation passif de chaleur en effectuant un suivi climatique dans la vitrine d'exposition après installation de l'éclairage LED. Nous conseillons également de sous-alimenter légèrement la LED afin de réduire la production de chaleur et d'augmenter sa durée de vie.

2. Dégradations photochimiques

Les rayonnements susceptibles de provoquer des altérations photochimiques font partie d'une portion de la lumière visible et du rayonnement ultraviolet. Les LEDs ont pour avantage de n'émettre aucun rayonnement UV ou en très faible quantité – en-dessous du seuil de $75 \mu\text{W}/\text{lm}^{96}$. La lumière visible de l'éclairage LED est, en revanche, susceptible de provoquer des altérations photochimiques.

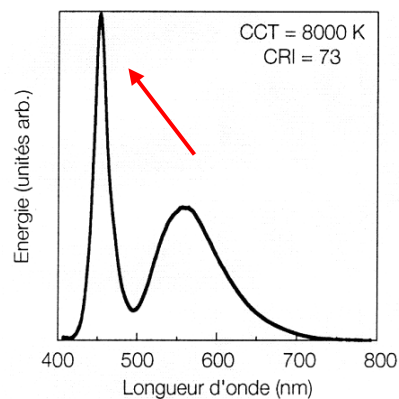
Des recherches de la commission internationale de l'éclairage, publiées en 2004, ont réalisé une comparaison de potentiel de dommages photochimiques entre plusieurs sources lumineuses. Ces études ont pu mettre en évidence que la température de couleur des sources influent considérablement sur le potentiel de dommage. Plus la température de couleur est froide, plus le spectre d'émission est déplacé vers des ondes de courte longueur, plus le potentiel de dommages photochimique est élevé⁹⁷ (ill.5).

<u>Température de couleur</u>	<u>Potentiel relatif de dommages</u>	<u>Source lumineuse</u>
3'000 K	1.04	Halogène tungstène
4'000 K	1.37	Lumière blanche froide fluorescente
5'000 K	1.71	Lumière du soleil et lumière du jour
6'000 K	2.01	Lumière du jour source fluorescente
7'000 K	2.28	-

III. 5 Tableau comparatif du dommage potentiel relatif en relation avec la température de couleur de différentes sources lumineuses (traduit de © Weintraub, 2010 [en ligne])

2.1 Lumière « blanche » LED neutre ou froide, température de couleur > à 4'000 K

Le spectre d'émission des LEDs dites blanches de température de couleur supérieure à 4'000 K mettent en évidence un déséquilibre spectral vers le bleu. Il s'agit de pics étroits, compris dans les ondes bleues de la lumière visible en-dessous de 440 nanomètres (ill.6, ill.7. a), p.27). Les risques photochimiques sont associés à la lumière bleue, proche du domaine de l'ultraviolet, qui comprend des ondes de courte longueur dans la lumière visible. Ces bandes étroites et très énergétiques sont nocives pour les objets photosensibles et suspectées de provoquer des altérations photochimiques plus rapidement en comparaison avec les autres sources



III. 6 Spectre d'émission d'une source LED blanche à très haute efficacité, (©Ferrini, 2010, p.38.)

⁹⁶ Michalski, 2010 [en ligne]

⁹⁷ Commission internationale de l'éclairage, 2004.

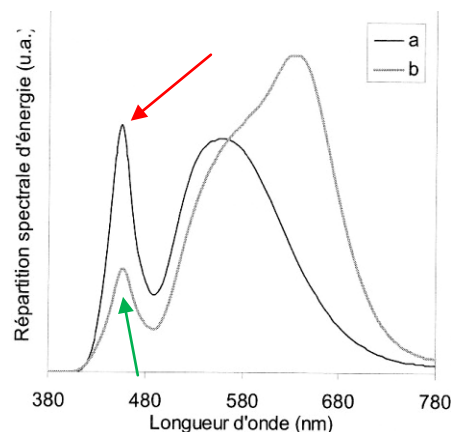
lumineuses dites « classiques »⁹⁸. Les LEDs couplées à un seul luminophore phosphore et les LEDs RGB, RGBA qui émettent une lumière bleue dans le spectre visible, représenteraient un facteur de risque de dégradations photochimiques (cf. annexes, ill.31, p.53).

Kronkright a évalué la puissance de ces ondes bleues comme étant 20% à 400% plus élevées qu'une lampe halogène de type MR-16 au même niveau d'éclairement⁹⁹. Les éclairages LED démontrant un déséquilibre spectral vers la lumière bleue seraient alors susceptibles de provoquer des phénomènes de décoloration beaucoup plus rapides. Weintraub a remis en doute cette appréciation en affirmant que les dommages photochimiques ne peuvent pas être calculés sur la base de la comparaison de la hauteur des pics du spectre d'émission des sources lumineuses mais évalué en tenant compte de l'ensemble du spectre. Pour lui, à l'heure actuelle, il est nécessaire de mettre en place une série de test afin de s'assurer de ces hypothèses¹⁰⁰.

Cependant, Weintraub insista également sur le potentiel de dommages plus élevé des sources LED froides « *une source lumineuse dont la température de couleur est élevée telles que les sources dites lumière du jour à 6'000 K a deux fois le potentiel de dommage d'une lampe halogène tungstène* »¹⁰¹. L'utilisation d'un éclairage LED de température de couleur entre 4'000°K à 6'500°K pour l'illumination des collections photosensibles doit, par conséquent, être évitée.

2.2 Lumière « blanche » LED chaude ou neutre, température de couleur < à 4'000 K

Les recherches à l'heure actuelle tendent à modérer le risque photochimique pour les sources d'éclairage LED « blanches » qui disposent d'une température de couleur entre 2'700 K et 4'000 K (chaude et neutre). La portion de la lumière visible comprend des ondes dont la longueur d'onde est plus élevée et moins énergétiques. Le pic dans la lumière bleue se situe seulement aux alentours de 445-455 nanomètres, au-dessus de la région de 440 nm, très énergétique et fortement dommageable. Les lampes LED chaudes ont une petite puissance quasi nulle dans la région située au-dessous de 440 nm¹⁰² (ill.7, b.). Cela a pour conséquence une « agressivité » réduite en matière de lumière visible.



III. 7 Répartition spectrale d'énergie relative de deux sources LED blanches : **a**) LED blanc froid à un phosphore, Tc environ 5'500 K, **b**) LED blanc chaud à plusieurs phosphores, Tc environ 2'750 K, (©Viénot, 2008, p.220.)

⁹⁸ Kronkright, 2010 [en ligne]

⁹⁹ Ibidem.

¹⁰⁰ Weintraub, 2010 [en ligne]

¹⁰¹ Ibidem, traduction de « *a high color temperatur source with a full spectrum such as daylight at 6'000°K has twice the damage potential of a tungsten halogen lamp* »

¹⁰² Weintraub, 2010 [en ligne]

Saunders et Kirby ont évalué le degré potentiel de dommages photochimiques de plusieurs sources lumineuses en exposant un ensemble de matériaux très photosensibles (pigments et textiles) sous des lampes fluorescentes lumière du jour, lampes tungstène halogènes et des lampes fluorescentes « musée ». Les résultats suggéraient que le facteur déterminant pour évaluer le degré de dommage photochimique est la proportion d'UV émise par une lampe. Se basant sur ce fait, les auteurs ont extrapolé les résultats et pronostiqué un degré de dommage potentiel de la LED comme étant équivalent à celui d'une lampe halogène tungstène¹⁰³.

Weintraub suite aux interrogations du AIC Green Task Force, a mis au point une expérience avec Art Preservation Services afin d'évaluer le degré potentiel de dommages photochimiques des sources LED « chaudes » en comparaison avec six différentes combinaisons de lampes halogènes tungstène avec des filtres UV. Les résultats indiquaient que les deux lampes LED de température de couleur chaude ont un degré potentiel de dommages plus faible que les sources halogènes tungstène, avec ou sans filtre UV¹⁰⁴. L'éclairage LED peut ainsi être adapté à la conservation des objets photosensibles mais à condition qu'il s'agisse d'un éclairage de température de couleur compris entre 2'700°K et 4'000°K.

3. Recommandations en terme d'éclairement

Les différences notables entre le spectre d'émission d'un éclairage LED composite et échantillonné par une série de pics et celui des sources lumineuses qui émettent un spectre continu et homogène rend la concordance en matière de recommandations complexe. Jusqu'à maintenant, les recherches avaient réussi à démontrer une certaine équivalence entre ces normes d'éclairement et les sources lumineuses qui apparaissaient sur le marché. Or, comme l'a souligné Kronkright, « *il est important de se rappeler que 50 lux, 65 lux ou n'importe quel niveau d'éclairement d'une source LED n'est pas le même que 50 lux, 65 lux, etc. d'une source à incandescence. Les répartitions spectrales d'énergies sont différentes.* »¹⁰⁵. A ce jour, il faut donc reclarifier les recommandations en terme d'éclairement pour un éclairage LED. Le sujet requiert une collaboration avec des laboratoires scientifiques compétents en la matière.

La lumière visible perdure un facteur d'altération des objets photosensibles que nous devons maîtriser, qu'il s'agisse d'un éclairage LED ou d'un éclairage classique. Dans cette optique, les recommandations en termes d'éclairement restent de vigueur en attendant la publication d'études à ce sujet. Le contrôle du niveau d'éclairement doit être effectué en tenant compte des différentes catégories de sensibilité à la lumière des matériaux et de la DTE.

¹⁰³ Saunders et Kirby, 2008.

¹⁰⁴ Weintraub, 2010 [en ligne].

¹⁰⁵ Kronkright, 2010 [en ligne], traduit de « *it is important to remember that 50 lux, 65 lux or any light level from an LED source is *not* the same as 50 lux, 65 lux, etc. from an incandescent source. The spectral power distributions (SPD's) are different* »

B. Conséquences sur la santé

Suite à une inquiétude grandissante de la part de la société OSYRIS à propos de l'éclairage LED et de ses possibles impacts sur la rétine, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail (ANSES) a publié en 2010 un document sur les risques photobiologiques liés à l'éclairage LED. Le rapport présente une analyse des effets sanitaires potentiels de la méthode LED bleue couplée à un luminophore phosphore. L'éblouissement et les effets photochimiques ont été déterminés comme étant les risques les plus inquiétants tant au niveau de la probabilité d'occurrence que de la gravité des dangers.

En ce qui concerne le point de l'éblouissement, il est apparu que les diodes de puissance utilisées dans les applications d'éclairage peuvent avoir des luminances 1'000 fois supérieure à celle des lampes conventionnelles. Cela est dû à une surface d'émission ponctuelle et restreinte. De plus, l'œil est plus susceptible d'être ébloui par des lumières bleues et jaunes. Le rayonnement direct d'une source LED représente un niveau d'inconfort visuel élevé.

Les effets photochimiques sont intimement liés à la portion de lumière bleue qui a déjà éveillé nos craintes du point de vue de la conservation des collections. Il a été démontré, de par l'observation sur des espèces animales et sur des humains, qu'il existe une toxicité de la part des ondes de courte longueur sur la rétine. La lumière bleue, plus énergétique, est associée à un stress oxydatif cellulaire et à des effets aggravants sur la dégénérescence maculaire liée à l'âge. Les risques photochimiques sont étroitement liés à la dose d'exposition totale à une lumière bleue LED. Il s'agit d'un effet cumulatif. Selon ce rapport, trois populations sont plus susceptibles d'être touchée par ce problème : les enfants, les populations sensibles à la lumière, et les personnes particulièrement exposés aux LED. Au niveau de la toxicité, la norme NF EN 62471 évalue les sources lumineuses sur la luminance et l'éclairement et s'intéresse à l'ensemble des dangers photobiologiques pour l'œil. Il existe quatre groupes relatifs à des degrés de risques différents : le groupe 0 (exempt de risque), le groupe 1 (risque faible), le groupe 2 (risque modéré) et le groupe 3 (risque élevé). L'ANSES a effectué des mesures de luminance sur plusieurs sources LED sur le marché et accessibles au public. Les lampes sur le marché public doivent être comprises dans le groupe 0 ou 1. Certaines LEDs testées, utilisées pour des éclairages domestiques ou la signalisation et le balisage, ont démontré appartenir au groupe 2. L'ANSES ne doutait pas qu'avec l'augmentation des flux lumineux et des luminances, nous aurons affaire dans l'avenir à des LEDs dans le groupe 3 accessibles au grand public. L'ANSES a conclu son rapport en insistant sur l'importance que toute source LED appartenant au groupe 2 et 3 soit retirée du marché et à ce que les systèmes d'éclairage ne permettent pas une vision directe du faisceau lumineux LED afin d'éviter tout éblouissement¹⁰⁶.

¹⁰⁶ Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail, ANSES, 2010 [en ligne].

C. Qualité de la lumière produite

Dans l'appréciation globale d'un éclairage muséographique, le choix d'une source lumineuse s'oriente inéluctablement sur les critères esthétiques de la lumière produite. La commission internationale de l'éclairage préconise d'utiliser des lampes avec un IRC d'au moins 90¹⁰⁷ - 100 étant le niveau maximal équivalent à l'IRC de la lumière du jour et des lampes à incandescence.

1. Lacunes de l'éclairage LED

Il existe à ce jour peu de sources LED qui peuvent revendiquer un IRC équivalent ou supérieur à 90 d'autant plus que le prix à payer est obligatoirement une efficacité lumineuse à la baisse¹⁰⁸. Plusieurs caractéristiques intrinsèques des LEDs sont à la base de ce problème :

- Le caractère monochromatique de la lumière d'une LED sur lequel a insisté Sanial¹⁰⁹. Toutes les LEDs sont caractérisées par la production de lumière composée d'une seule radiation. Si cela peut avantager le domaine de la décoration avec une saturation de la couleur, il s'agit d'une entrave qualitative importante pour le domaine de l'éclairage. Pour Sanial, « *cette qualité est très médiocre et peut engendrer des problèmes visuels sérieux* »¹¹⁰.
- Le caractère unidirectionnel de la lumière LED : au contraire de la lumière d'une lampe à incandescence qui émet dans toutes les directions de l'espace de manière homogène, le faisceau d'une LED de haute puissance s'oriente dans des angles d'émission de 110°C à 140°C. Les fabricants parent à cela en utilisant des lentilles optiques spécifiques à des applications¹¹¹.
- La non-reproductivité de production en série des LEDs¹¹² notamment sur le plan de la température de couleur. Les propriétés et la qualité des LEDs sont aléatoires. Si un tri est effectué par les fournisseurs afin de garantir de bonne qualité, on remarque cependant que tous les produits non-aboutis arrivent tout de même sur le marché¹¹³.
- « *Les performances en matière d'éclairage sont limitées par le caractère étroit – moins de 50 mn – des spectres d'émission des LEDs à semi-conducteur* »¹¹⁴.

¹⁰⁷ Michalski, 2010 [en ligne]

¹⁰⁸ Selon entretien avec monsieur Zuppiroli, le 05.07.11 et Sanial, 2011, p.206.

¹⁰⁹ Sanial, 2011.

¹¹⁰ Sanial, 2011, p.206.

¹¹¹ Pousset, 2010, p.53.

¹¹² Zissis, 2009, p.44.

¹¹³ Selon entretien avec l'entreprise ERCO, le 13.05.11 à Saint-Saphorin

¹¹⁴ Ferrini, 2010, p.40.

2. Les différentes technologies LED pour la production de lumière blanche et la qualité de la lumière émise

En ce qui concerne les sources LED bleues couplées à un seul luminophore, outre leur inadéquation avec les impératifs de la conservation, elles évoquent des désagréments qui portent préjudice à la muséographie. Le spectre d'émission des sources LED à très haute efficacité, composite et échantillonné par une série de pics, est très loin du spectre d'émission continu et équiénergétique de la lumière du jour qui nous sert de référence. Les vides chromatiques laissés dans les tons verts et jaunes ont pour conséquence un rendu des couleurs que Zuppiroli a qualifié de « *désastreux* »¹¹⁵. Ce rendu des couleurs médiocre met en péril de manière significative la perception des couleurs et le rendu des détails. Le déséquilibre spectral dans les tons bleus a pour effet non seulement de provoquer des phénomènes d'éblouissement et d'inconfort visuel mais également de créer une ambiance froide déplaisante pour le visiteur. Dans ce procédé, on note également pour désavantage le phénomène de « halo » coloré et des variations de teintes très limitées¹¹⁶.

En ce qui concerne le procédé utilisant les diodes RGB et RGBA, les LEDs rassemblent des lumières monochromatiques qui ne couvrent qu'une faible partie du spectre visible, et montrant la lacune de multiples longueurs d'ondes. La lumière résultante n'est pas homogène¹¹⁷. Les LEDs RGB créent des ombres colorées dans les couleurs complémentaires – jaune, cyan et magenta - qui portent préjudice à l'appréciation des couleurs. Cela implique un IRC de piètre qualité (<60) qui, selon Ferrini, même pour le futur « *ne peut en aucun cas dépasser 85 pour une température de couleur inférieure à 4'000 K* »¹¹⁸. Viénot et al ont mené une première expérience en 2005 afin de dépister les défauts de la vision des couleurs relatifs à des éclairages LED : RGB, RGBA, RGBA couplée à une LED froide, en les comparant à une source lumineuse à spectre continu, halogène tungstène. L'expérience consistait à tester la discrimination des couleurs des participants en utilisant le test DD15. L'équipe de Viénot a pu recenser jusqu'à 47,4% d'erreurs dans la discrimination des couleurs pour un éclairage LED RGB et 31,6% pour les RGBAs. Ce rapport a eu pour conclusion d'éviter ces sources¹¹⁹.

Si la méthode LED UV couplée de trois diodes RGB peut atteindre des IRC de 90 à 95, elle possède une efficacité lumineuse moindre couplée à de faible puissance.

En procédant par élimination, la méthode qui semble le plus se rapprocher de la lumière blanche pour un éclairage spécialisé est la LED bleue couplée à plusieurs luminophores phosphores. Cependant,

¹¹⁵ Selon monsieur Zuppiroli, lors d'un entretien à l'EPFL le 05.07.11.

¹¹⁶ Zissis, 2008, p.40, tableau 1.1

¹¹⁷ Sanial, 2011, p.210.

¹¹⁸ Ferrini, 2010, p.40.

¹¹⁹ Viénot et al, 2005.

nous attirons l'attention sur le fait qu'un meilleur IRC implique obligatoirement une efficacité lumineuse à la baisse (cf. annexes, ill.32. p.54) et un investissement financier conséquent. Les éclairages LED les plus performants en la matière atteignent au maximum un IRC de 96¹²⁰.

Les meilleurs éclairages LED sont obtenus en mixant plusieurs LEDs blanches chaudes et froides et en parant aux lacunes chromatiques avec des diodes de couleurs. Le couplage de ces différentes sources lumineuses permet d'obtenir un IRC supérieur à 90. Le problème majeur de ce procédé réside dans les différences de stabilité à la température et de stabilité à la durée de chacune des diodes utilisées pour le mixage de la lumière. Ces éclairages peuvent nécessiter des réajustements¹²¹.

3. Remise en question de l'adéquation de l'IRC avec l'éclairage LED

Plusieurs études menées sur l'éclairage LED ont relevé des défauts et des manques dans l'évaluation qualitative d'un éclairage à semi-conducteur basée sur l'IRC élaboré par la commission internationale de l'éclairage en 1974¹²².

Boissard et al. ont évalué l'appréciation et la qualité d'un éclairage LED en comparaison avec des sources halogènes ou fluorescentes. Pour ce faire, ils ont demandé à des participants de reproduire avec des LEDs blanches, rouges, cyan et ambre la perception offerte d'un éclairage halogène ou fluorescent. Les participants jouaient sur l'ajustement des intensités des différentes familles de LED afin d'obtenir une sensation visuelle similaire avec pour référence une charte colorimétrique et une reproduction d'un tableau de Vermeer¹²³. Les chercheurs demandaient ensuite aux participants d'évaluer la proximité du rendu entre la source de référence et l'éclairage LED. Les deux comparaisons (charte colorimétrique et tableau) ont montré qu'il est possible de trouver un mélange homogène avec un éclairage LED qui est capable de reproduire un éclairage halogène ou fluorescent. Les trois quarts (73%) des participants ont jugé l'éclairage LED chaud comme étant meilleur à l'éclairage halogène et presque la moitié (44%) ont préféré l'éclairage LED froid à l'éclairage fluorescent. L'IRC des LEDs étaient cependant inférieurs (70 à 85) à celui de l'éclairage halogène (96) et celui de l'éclairage fluorescent (91). L'étude a conclu à des déficiences du système de l'IRC ne se référant qu'à la fidélité des couleurs rendues par une source lumineuse et ne prenant pas en compte d'autres aspects liés à la qualité des couleurs et à la préférence de couleur de l'observateur¹²⁴.

Parallèlement, Viénot et al ont menés une seconde expérience en 2008 sur la finesse de discrimination des sources d'éclairage LED. Les participants étaient invités à classer des pions colorés formant un cercle chromatique. L'hypothèse posée était de dire que des erreurs de classement répétées

¹²⁰ Weintraub, 2010 [en ligne]

¹²¹ Viénot, 2008, p.222.

¹²² Commission internationale de l'éclairage, 2007, p.V.

¹²³ Viénot, 2008, p.234.

¹²⁴ Boissard et al, 2009.

remettaient en doute la qualité de la source lumineuse. Or, s'il a été démontré que les sources RGB et RGBA étaient responsables d'erreurs de discrimination, les participants ont fait remarquer que ces mêmes sources semblaient rehausser les couleurs, les amenant à être plus vives. Viénot et al ont mis en évidence que la qualité de la lumière dépendait des critères sur lesquels nous fondons notre jugement. La lumière peut soit restituer une fidélité des couleurs avec une discrimination fine des nuances colorées soit embellir la perception des couleurs¹²⁵. En matière de muséographie, il semble que la priorité devrait être accordée à la fidélité des couleurs et à la finesse de discrimination.

La commission internationale de l'éclairage, consciente de ces nouveaux problèmes, a publié en 2007 un rapport à ce sujet. Les recherches ont également démontré une contradiction entre classement visuel et classement fondé sur l'IRC. Le comité de recherche a conclu à une inadéquation entre l'IRC et de nouvelles sources d'éclairage telles que les LEDs. Le développement d'un nouvel indice est en cours¹²⁶.

D. Problèmes techniques recensés dans les musées suisses

Lors de nos entretiens avec plusieurs musées suisses, nous avons relevé certains problèmes techniques supplémentaires, reliés à l'utilisation d'un éclairage LED que nous présentons ci-dessous :

Perturbations optiques

Les LEDs laissent parfois apparaître des points lumineux. Cela peut-être synonyme d'inconfort visuel et de gêne optique pour le visiteur. L'entreprise ERCO recommande d'utiliser un mitigeur, une optique spécialisée pour ce problème, afin de parer à cet inconvénient.

Problèmes de réflexion de l'éclairage LED

Devant l'impossibilité de trouver des pièces de remplacement à un éclairage à fibres optiques, le Laténium a choisi d'équiper ses vitrines en LED. Après installation de l'éclairage LED dans certaines vitrines « lacustres » du Laténium, le personnel de musée s'est rendu compte que le remplacement des fibres optiques par des barrettes LED changeait complètement le circuit de la lumière dans les tablettes de Plexiglas®. L'éclairage LED, plus focalisé et éblouissant, faisait apparaître les rayures du Plexiglas®, provoquant des perturbations. Le Laténium a tenté de résoudre ce problème en abaissant l'intensité lumineuse dans les vitrines sans résultats notables. Les intervenants de l'éclairage muséal ont alors mis au point un système d'optique en Plexiglas® afin d'atténuer ces phénomènes perturbateurs. Ce système de diffusion fonctionne à l'heure actuelle.

¹²⁵ Viénot et al, 2008.

¹²⁶ Commission internationale de l'éclairage, 2007.

VI. Bilan

Les difficultés actuelles concernant l'éclairage LED résident dans la très large variété de produits LED disponible sur le marché qui démontre une variabilité de qualité conséquente. Nous manquons cruellement d'informations précises sur les produits LED afin de nous guider dans nos choix. Il faut être extrêmement prudent lorsque l'on considère les informations données par les producteurs. A titre d'exemple, il est courant de se confronter à des ampoules LED sur le marché où le fabricant a noté à titre d'information « 5 W (sous entendu LED) = 20W (sous entendu halogène) ». Cette équivalence est réalisée de manière erronée, sans prendre en compte le flux lumineux, de 200 lumens pour la lampe LED mais 500 lumens pour la lampe halogène. Il faudrait alors 3 LEDs pour prétendre au même flux lumineux qu'une lampe halogène. Comme l'a souligné Zuppiroli, il est nécessaire de créer des commissions en charge d'effectuer un tri pour d'une part assurer notre sécurité – santé - et d'autre part exiger des informations sur les produits¹²⁷. Un système de contrôle des produits LED a été instauré aux Etats-Unis mais il s'agit là d'une exception en la matière. Appréhendant la nécessité de créer une base de données qui recoupe les informations et caractéristiques des sources LED qui se trouvent sur le marché, the U.S Department of Energy (DOE) a mis au point le programme CALIPER, Commercially Available LED Product Evaluation and Reporting. Ce programme a pour objectif de référencier les propriétés et performances des sources lumineuses sur le marché, particulièrement les LEDs, par le biais d'une série de tests – LM-79. CALIPER propose des comparaisons entre les données des produits, accessibles à tous sur leur site internet¹²⁸. Comme l'a souligné Druzik, les producteurs de LED doivent impérativement pouvoir fournir certaines informations telles que la répartition spectrale d'énergie, la température de couleur, l'efficacité lumineuse (ou rendement), la puissance, l'IRC et la distribution de l'intensité lumineuse¹²⁹. Dans l'approche du choix d'un éclairage LED pour la conservation des collections et la muséographie, nous recensons trois critères impératifs que nous synthétisons dans le tableau ci-dessous :

Critères impératifs	Possibilités	Réquisitions
Température de couleur	2'700 K à 8'000 K	MATERIAUX PHOTSENSIBLES Tc : 2'700 K à 4'000 K
IRC	60 à environ 95	IRC ≥ 90
Groupe de risques (ANSES)	0 à 2	0 à 1

III. 8 Critères de choix de l'éclairage LED impératifs, possibilités et réquisitions (©HECR Gillioz, 2010)

¹²⁷ Selon entretien avec Zuppiroli, le 05.07.11 à l'EPFL.

¹²⁸ Energy Efficiency and Renewable Energy, 2009, [en ligne]

¹²⁹ Druzik, 2010 [en ligne]

VII. Conclusion

Au regard des informations synthétisées dans ce présent travail, l'éclairage LED de température de couleur basse et neutre - 2'700 K à 4'000 K - semble tout à fait adapté à la conservation des collections photosensibles. Selon les recherches effectuées sur le sujet, il semblerait même que le potentiel de dommages photochimiques d'une lumière chaude LED soit moins élevé que celui d'une source à incandescence ou halogène (avec ou sans filtres IR et UV). La technologie LED qui bénéficie par ailleurs des avantages de n'émettre ni rayonnement infrarouge, ni rayonnement ultraviolet, réduit le risque thermochimique et photochimique et nous exempte des contraintes de filtrage des rayonnements invisibles. La lumière neutre et froide d'un éclairage LED température de couleur entre 4'000 K et 6'500 K doit en revanche être considérée comme beaucoup plus énergétique et potentiellement dangereuse pour les collections photosensibles. Etant donné que cette technologie comporte de nombreux désavantages tant au point de vue de la conservation que de la muséographie que des conséquences sur la santé, il nous semble justifié de mettre en garde tous les intervenants muséaux et de recommander d'éviter ces sources en milieu muséal.

En ce qui concerne les questions climatiques et spécifiquement thermiques de l'éclairage LED, les observations effectuées dans ce présent travail sont encourageants du point de la stabilité climatique des collections. Les variations journalières maximales enregistrées dans les vitrines testées comprises entre 4.7°C (« Angola ») et 1.2°C (« Musée olympique »), ont présenté des valeurs modérées. Les tests effectués au sein du Laténium ont montré que les éclairages LED peuvent atteindre l'objectif de la conservation préventive avec une variation journalière de température \leq à 2°C. L'éclairage LED doit cependant être considéré avec autant d'attention que les éclairages dits « classiques » en ce qui concerne la production de chaleur. Nous veillerons ainsi à placer les transformateurs en-dehors de la vitrine, à ne pas dépasser le courant préconisé par les fiches techniques voire à le sous-alimenter faiblement et à nous assurer de l'efficacité de système de dissipation de chaleur en réalisant des relevés thermo-hygrométriques à l'intérieur de la vitrine au début de l'installation.

Si l'éclairage LED comporte d'indéniables avantages du point de vue de la réduction de la consommation énergétique, de l'efficacité lumineuse, de la durée de vie et de la résistance, il a en revanche pour conséquence une perte de qualité générale. Il est intéressant de constater que dans leurs efforts de réduction de la consommation globale, les gouvernements et législations ont reniés une part importante de l'objectif d'un éclairage : sa qualité¹³⁰. Les considérations écologiques nous ont fait perdre de vue l'objectif de l'éclairage artificiel de se rapprocher de plus en plus du spectre équiénergétique qui caractérise la lumière du jour. Comme l'a souligné Ferrini, on constate « *que la sensibilisation de l'opinion publique par rapport aux questions énergétiques ne s'accompagne pas*

¹³⁰ Ferrini, 2010 et Sanial, 2011.

d'une égale sensibilisation aux problèmes liés à la qualité de l'éclairage »¹³¹. C'est cette perte de qualité qui nous semble injustifiable dans des milieux spécialisés tel que le musée. La priorité en matière d'éclairage muséographique ne devrait pas être accordée à des ressorts économiques. Il s'agit d'un domaine spécialisé qui nécessite des caractéristiques optimales en matière de lumière artificielle. Dans cette optique, seuls les éclairages LED de température de couleur chaude compris entre 2'700°K et 4'000°K et bénéficiant d'un IRC élevé au-dessus de 90, devraient être employés pour l'éclairage muséographique. Les éclairages LED RGB et RGBA ont pour inconvénients des lacunes du point de vue de la discrimination fine des couleurs qui portent préjudice à l'éclairage muséographique. Ces sources devraient être évitées. Les LEDs à haute efficacité lumineuse présentent un déséquilibre dans les tons bleutés qui porte préjudice à l'appréciation des couleurs de l'objet et rend l'ambiance muséographique froide. Les LEDs bleues couplées à plusieurs luminophores phosphores proposent, en l'état actuel, les meilleurs IRC de la lumière LED blanche et peuvent prétendre à couvrir les attentes d'un éclairage muséographique. La meilleure qualité de la lumière LED est obtenue en mixant plusieurs LEDs blanches et de couleurs. Ces éclairages sont cependant sujets à une instabilité de la température de couleur et de l'IRC en raison du vieillissement variable des différentes LEDs.

Nous assistons à l'heure actuelle à une sorte d'élitisme de l'éclairage, issu du caractère non-reproductible de la production LED. Parce que les températures de couleur et les performances optiques ne sont pas reproductibles, les meilleures LEDs ne représentent qu'une petite partie de la production. Cela implique des investissements financiers conséquents pour un éclairage de qualité, qui n'est pas à la portée de tous les budgets dans le milieu muséal, même si cette technologie évoque des réductions de consommation énergétique à long terme. La diminution des prix des LED n'est pas envisageable avant 2015 voire une dizaine d'année¹³².

Considérant ces aspects financiers et l'avancée spectaculaire de la technologie LED qui risque de rendre les produits LED présents très vite obsolètes, nous sommes en droit de nous poser la question de la pertinence du remplacement d'un éclairage halogène général pour un éclairage LED général dans les musées à l'heure actuelle. Compte tenu du manque de recul au sujet de la conservation et de la qualité de la lumière LED, il peut s'agir d'un pari risqué pour un budget limité. Comme l'ont souligné Saunders et Kirby, lorsque le degré potentiel de dommages de plusieurs sources lumineuses est équivalent ou note peu de différences « *le choix de la lampe peut alors être effectué sur des critères esthétiques, financiers et d'efficacité sans affecter la détérioration de l'objet* »¹³³. Si l'éclairage LED semble être une solution en l'état actuel des recherches, l'éclairage halogène – avec filtres UV et IR -

¹³¹ Ferrini, 2010, p.37

¹³² Selon entretien avec Zuppiroli, le 05.07.11 à l'EPFL

¹³³ Traduit de « *the choice of lamps can therefore be made on the grounds of aesthetic, economic and energy efficiency criteria without affecting the deterioration of the object* » Saunders et Kirby, 2008, p.766.

reste une alternative satisfaisante qui certifie un rendu des couleurs, basé sur la fidélité des couleurs et la discrimination fine des nuances, à la hauteur de la conservation préventive et de la tâche muséographique.

Pour un éclairage localisé comme le cas particulier des vitrines, Ezrati estime que les LEDs peuvent trouver leur utilisation pour l'éclairage intérieur des vitrines malgré un IRC qui n'est pas encore excellent¹³⁴. L'éclairage LED en vitrine semble être une solution avantageuse, permettant d'illuminer les objets à l'intérieur d'une enceinte fermée sans causer un réchauffement problématique pour la préservation des collections. Un éclairage halogène, fluorescent ou à décharge peut difficilement être compétitif avec un éclairage LED dans ce cas particulier. Non seulement l'éclairage LED démontre de bons résultats au niveau de la stabilité climatique mais il a également pour avantage la miniaturisation du système, la réduction d'encombrement et la facilité de montage-démontage du dispositif pouvant satisfaire l'itinérance d'une exposition. L'éclairage LED est également une alternative écologique avantageuse pour les espaces muséaux en dehors des salles d'exposition.

Nous assistons aux prémices de l'éclairage LED. Les producteurs de sources lumineuses sont conscients que le challenge LED va s'orienter autour de la qualité de la lumière dans les années à venir¹³⁵. Il est très probable que cette technologie prometteuse et sujette à des améliorations, est susceptible de répondre de manière complète aux défis des milieux spécialisés dans le futur. Les perspectives de développement résident dans deux possibilités. La première consiste à mixer une lumière blanche froide couplée à une lumière blanche chaude avec des diodes émettant dans le rouge et le vert pour parer aux lacunes chromatiques. Ce dispositif a été réalisé par l'EPFL et promet des indices de rendu des couleurs équivalents à 100. La deuxième voie réside dans l'éclairage OLED ou LEDs organiques parce que « *les OLEDs profitent de spectre d'émission 3 à 4 fois plus larges qu'une LED standard* »¹³⁶. En le couplant avec des LEDs RGB, ce procédé est susceptible de mettre en œuvre un éclairage avec un IRC entre 90 et 100 pour des températures de couleurs comprises entre 3'000°K à 6'000°K¹³⁷. Selon Zuppiroli, 20 ans seront nécessaires à l'arrivée de cette technologie sur le marché domestique pour des raisons de rendements faibles et de coûts trop onéreux à l'heure actuelle¹³⁸.

¹³⁴ Ezrati, 2002, p.55.

¹³⁵ Ferrini, 2010, p.41.

¹³⁶ Ferrini, 2010, p.42.

¹³⁷ Ibidem.

¹³⁸ Selon entretien avec Zuppiroli, le 05.07.11, à l'EPFL.

VIII. Glossaire

Les sources abrégées sont citées de manière exhaustive dans la bibliographie.

Anode : « électrode où a lieu la réaction d'oxydation. Electrode reliée à la borne positive du générateur extérieur. » (Merlet et Bérès, 2003, p.69)

Candela : « unité SI d'intensité lumineuse : La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian. $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm} \times \text{sr}^{-1}$. » (Commission internationale de l'éclairage, 1987, p.33)

Cathode : « électrode de sortie du courant dans un électrolyseur, ou électrode qui est la source primaire d'électrons dans un tube électronique. Electrode où a lieu la réaction de réduction. » (Merlet et Bérès, 2003, p.186.)

Colorimétrie : « ensemble de données et de méthodes destinées à la spécification des couleurs, de leur différences et de leur apparence. » (Viénot, 2008, p.210 basé sur la définition de la commission internationale de l'éclairage, 2004)

Configuration électronique : « ordre et caractéristiques du remplissage des orbitales électroniques par les différents électrons d'un atome [...] » (Futura-sciences [en ligne]. 2011 [consulté le 10 juillet 2011]. URL : <http://www.futura-sciences.com>)

Dépréciation de lumen : « *diminution de rendement en lumen qui se produit lorsqu'une lampe est en fonctionnement. Les chercheurs basent leur appréciation de la durée de vie sur le nombre d'heures de fonctionnement avant que la moitié des lampes testées n'atteignent la limite de la dépréciation en lumen.* » (Energy efficiency and renewable Energy, 2009 [en ligne])

Eclairage : « *maîtrise de la lumière afin de répondre à des objectifs aussi bien fonctionnels qu'esthétiques.* » (Ezrati, 2002, p.138.)

Eclairement : « *effet résultant du flux lumineux sur une surface : il se mesure en lux.* » (Ezrati, 2002, p.139.)

Efficacité lumineuse : « *quotient du flux lumineux émis par la puissance consommée par la source en lm/W* » (Commission internationale de l'éclairage, 1987, p.36)

Equiénergétique (spectre) : « *spectre contenant toutes les radiations dans l'intervalle de 400-700nm, avec une même énergie.* » (Sanial, 2011, p.19.)

Indice de rendu des couleurs (IRC) : « *évaluation quantitative du degré d'accord entre la couleur psychophysique d'un objet éclairé par l'illuminant en essai et celle du même objet éclairé par l'illuminant de référence, l'état d'adaptation chromatique ayant été correctement pris en compte.* » (Commission internationale de l'éclairage, 1987, p.64.)

Infrarouge (rayonnement) : « *rayonnement optique dont les longueurs d'ondes sont supérieures à celles du rayonnement visible.* » (Commission internationale de l'éclairage, 1987, p.2)

Lumière : « *partie visible des ondes électromagnétiques distribuées par une source naturelle (soleil) ou artificielle (lampes électriques).* » (Ezrati, 2002, p.139.)

Lumière du jour : « *il faut entendre sous ce vocable, la lumière dispensée par la voûte céleste, sans le rayonnement indirect du soleil [...]. C'est notre lumière de référence [...]. Le spectre est continu sur l'intervalle de 400-700 nm et quasiment énergétique avec cependant une légère surabondance de courtes longueurs d'ondes due à la teinte bleutée de la voûte céleste.* » (Sanial, 2011, p.19.)

Lumière visible (rayonnement) : « *rayonnement optique susceptible de produire directement une sensation visuelle. Il n'y a pas de limites précises pour le domaine spectral du rayonnement visible ; ces limites dépendent du flux énergétique qui atteint la rétine et de la sensibilité de l'observateur. La limite inférieure est prise généralement entre 360 nm et 400 nm et la limite supérieure entre 760 et 830 nm.* » (Commission internationale de l'éclairage, 1987, p.2.)

Luminance : « *peut être considérée comme l'éclat de la source elle-même, vue dans une seule direction ; elle a pour unité la candela par mètre carré.* » (Ezrati, 2002, p.139.)

Muséographie : « *ensemble des techniques nécessaires à la présentation et à la bonne conservation des témoins matériels que détiennent les musées. Dans le cadre des expositions, mise en espace qui intègre aussi bien les techniques de communication visuelle dans l'espace que les données de la conservation préventive.* » (Ezrati, 2002, p.140.)

Répartition spectrale d'énergie : « *le graphique de la répartition spectrale d'énergie montre la puissance des rayonnements à chaque longueur d'onde ou bande de longueurs d'ondes dans le spectre visible. Cela nous permet d'étudier les caractéristiques spectrales de la lumière visible.* » (Traduction libre de la définition de Federal Agencies Digitization Guidelines Initiative [en ligne]. 2011, [consulté le 07 juillet 2011]. URL : <http://www.digitizationguidelines.gov/>)

Synthèse additive : « *réalisation de toute la palette des couleurs par addition des radiations primaires qui sont le rouge, le vert et le bleu. Si on additionne en quantité égales des radiations monochromatiques « rouges primaires, vertes primaires et bleues primaires », on obtient le blanc théorique.* » (Sanial, 2007, p.95, p.97.)

Température de couleur : « *température, donnée en Kelvin ($0\text{ K} = -273\text{ °C}$), d'un corps noir (cavité percée d'une ouverture) qui, chauffé, émet un rayonnement de la même couleur que le rayonnement de la source testée.* » (Ezrati, 2002, p.140).

Ultraviolet (rayonnement) : « *rayonnement optique dont les longueurs d'ondes sont inférieures à celles du rayonnement visible.* » (Commission internationale de l'éclairage, 1987, p.3)

IX. Bibliographie

- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail, ANSES.
« *Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED)*, CIA SW L'ANSES, rapport d'expertise collective » In ANSES [en ligne]. ANSES, 2010 [consulté le 01.05.11].
URL : <http://www.anses.fr/Documents/AP2008sa0408.pdf>
- Association française de l'éclairage (AFE). *Guide pour l'éclairage des musées, des collections particulières et des galeries d'art*. Editions Lux, Paris, 1991.
- Bergeron, André et Costain, Charles. *L'éclairage dans les institutions muséales*. Musée de la civilisation, société des musées québécois, Québec, 1992. Chapitre 2, la lumière et la conservation, p.36-61.
- Boissard, Sophie. et Fontonyout, Marc. « Optimization of LED-based light blendings for objects presentation ». In *Commission internationale de l'éclairage [en ligne]*. CIE, 2011 [le 01.07.11]. URL : http://cie2.nist.gov/TC1-69/PA%20A-P8_boissard.pdf
- Chaumier, Serge et Le villain, Agnès. « Qu'est-ce qu'un muséographe ? ». *La Lettre de l'OCIM*, n° 107, septembre 2006, p.13.18.
- Commission internationale de l'éclairage (CIE). *Vocabulaire international d'éclairage*. Bureau central de la Commission électrotechnique internationale, Genève, 1987.
- Commission internationale de l'éclairage (CIE). *Colour rendering of white LED light sources*. Commission internationale de l'éclairage, Vienne, 2007.
- Courchesne, Luc. *L'éclairage dans les institutions muséales*. Musée de la civilisation, société des musées québécois, Québec, 1992. Chapitre 1, la lumière et le visiteur, p.20-34.
- Deitz, Philippe. *Histoire des luminaires, histoire des hommes*. Editions du Perron, Alleur, 2009.
- Druzik, J. « Caution urged when considering LED light sources for light-sensitive materials ». In *Conservation Distlist [en ligne]*. Conservation Distlist, 2011 [consulté le 14 avril 2011]. URL : <http://cool.conservation-us.org/byform/mailling-lists/cdl/2010/0502.html>
- Ecole des Métiers du Valais (CHAV | EMVs). *Physique des semi-conducteurs*. Cours d'optoélectronique de l'école des Métiers du Valais, Sion, 2011, *non publié*.
- *Energy Efficiency and Revewable Energy* [En ligne]. « Lifetime of white LEDs ». In *Energy Efficiency and Revewable Energy*, 2009 [consulté le 10 juin 2011]. URL : http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds.pdf
- *Energy Efficiency and Revewable Energy* [En ligne]. « Solid-state lighting, CALIPER program ». In *Energy Efficiency and Revewable Energy*, 2009 [consulté le 10 juin 2011]. URL : http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/about_caliper.html
- Ezrati, Jean-Jacques. *Théorie, technique et technologie de l'éclairage muséographique*. AS, Paris, 2002.

- Ferrini, Rolando. « Les enjeux du remplacement des lampes à incandescence, des lampes économiques mais quelle qualité d'éclairage ? ». *Electrosuisse*, n°6, 2010, p.37-42.
- Held, Gilbert. *Introduction to light emitting diode technology and applications*. Fla: Auerbach, Boca Raton, 2009.
- Institut canadien de conservation (ICC). *Notes de l'ICC, 2/1, Filtres ultraviolets*. Institut canadien de conservation, Ottawa, 1994.
- Kitsinelis, Spiros. *Light sources technologies and applications*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2011.
- Kronkright, D.P. « Caution urged when considering LED light sources for light-sensitive materials ». In *Conservation Distlist* [en ligne]. Conservation Distlist, 2011 [consulté le 14 avril 2011]. URL : <http://cool.conservation-us.org/byform/mailling-lists/cdl/2010/0361.html>
- Lehalle, Evelyne. « Préface, le créateur, la lumière et le visiteur ». In Association française de l'éclairage (dir.). *Guide pour l'éclairage des musées, des collections particulières et des galeries d'art*. Lux, Paris, 1991, p.3.
- Macleod, K.J. « L'éclairage des musées ». Bulletin technique de l'institut canadien de conservation, n°2, avril 1975, p.1-13.
- Marchand, Pierre. *Dictionnaire visuel pour tous*. Gallimard jeunesse, Paris, 1997.
- Massol, Laurent. « LEDs blanches : les différentes technologies ». In *LED engineering development* [en ligne]. LED engineering development, 2010 [consulté le 14 avril 2011]. URL : <http://www.led-development.fr/>
- Merlet, Philippe et Berès, Anémone. *Le petit Larousse 2003*. Larousse, Paris, 2003.
- Michalski, Stefan. « La lumière, l'ultraviolet et l'infrarouge ». In *Institut canadien de conservation* [En ligne]. ICC, 2010 [consulté le 10 juin 2011]. URL : <http://www.cci-icc.gc.ca/crc/articles/mcpm/chap08-fra.aspx>
- Zissis, Georges. *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*. Hermès, Paris, 2008. Chapitre 1, les diodes électroluminescentes, principes et défis, p.23-48.
- Pousset, Nicolas. « Caractérisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes électroluminescentes ». In *Centre pour la communication scientifique directe CCSd* [En ligne]. 2010 [consulté le 14 avril 2011]. URL : http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/45/28/45/PDF/These_Nicolas_POUSSET.pdf
- Pulfrey, David L. *Understanding modern transistors and diodes*. Cambridge University Press, Cambridge, 2011.
- Saunders, David et Kirby, Jo. « A comparison of light-induced damage under common museum illuminants ». ICOM, comitee for conservation. *15th Triennial Conference New Dehli*, september 2008, preprints volume II. James & James, 2008, p.766-773.
- Sanial, William. *Traité d'éclairage, 2^{ème} édition*. Cépaduès, Toulouse, 2007.
- Sanial, William. *Les sources de lumière artificielle*. Cépaduès, Toulouse, 2011.

- Schubert, E. Fred. *Light-emitting diodes*. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- *Technoscience* [en ligne]. Sarl Clevati, 6 juin 2006 [consulté le 06 mai 2011]. URL : <http://www.techno-science.net/>
- Tétreault, Jean. Polluants dans les musées et les archives : évaluation des risques, stratégies de contrôle et gestion de la préservation. Institut canadien de conservation, Ottawa, 2003.
- Viénot, Françoise et al. « Discriminating colours under LED illumination ». In *Proceedings of 10th Congress of the International Colour Association, Granada*. Granada, 2005, p.33-36.
- Viénot, Françoise et al. « Grading LED illumination : from colour rendering indices to specific light quality indices ». In *CIE 26th session*, Pékin, 2007, p.22-25.
- Viénot, Françoise et al. « Color appearance under LED illumination : The visual judgment of observers » In *Journal of Light and Visual Environment*, 2008.
- Viénot, Françoise. Les diodes *électroluminescentes pour l'éclairage*. Hermès, Paris, 2008. Chapitre 7, la qualité de la lumière blanche obtenue avec des LEDs, p.207-239.
- Weintraub, S. « Comments regarding LEDs and the risk to light sensitive materials». In *American institute for conservation of historic and artistic works* [en ligne]. American institute for conservation of historic and artistic works, 2011 [le 14 avril 2011]. URL: <http://www.conservation-us.org/index.cfm?fuseaction=Page.ViewPageID=1212>
- Zissis, Georges. *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*. Hermès, Paris, 2008. Chapitre 1, les diodes électroluminescentes, principes et défis, p.23-48.

X. Table des illustrations

III. 1 Spectre électromagnétique: type de radiation, longueur d'onde (m), fréquence (Hz) ; zoom sur la lumière visible. ©HECR Gillioz inspiré de l'illustration de Lecocq, <i>quarante jours un regard sur le monde</i> [en ligne]. [consulté le 01 juillet 2011], http://noelecocq.ovh.org/?p=5	10
III. 2 Modèle atomique de Bohr : noyau, organisation des électrons sur les couches électroniques atome structure [en ligne]. [consulté le 01 juillet 2011], http://www.resume-de-chimie.com/atome.htm	15
III. 3 Processus de recombinaison et naissance du photon au sein d'une LED, ©Pulfrey, 2010, p.139.	17
III. 4 Répartition de l'énergie pour différentes sources lumineuses, ©Kitsinelis, 2011, p.144	22
III. 5 Tableau comparatif du dommage potentiel relatif en relation avec la température de couleur de différentes sources lumineuses, traduit de © Weintraub, 2010 [en ligne]	26
III. 6 Spectre d'émission d'une source LED blanche à très haute efficacité, ©Ferrini, 2010, p.38..	26
III. 7 Répartition spectrale d'énergie relative de deux sources LEDs blanches : a) LEDs blanc froid à un phosphore, Tc environ 5'500 K, b) LEDs blanc chaud à plusieurs phosphores, Tc environ 2'750 K, ©Viénot, 2008, p.220.	27

III. 8 Critères de choix de l'éclairage LED impératifs, possibilités et réquisitions, ©HECR Gillioz	34
III. 9 Normes en matière de dose d'exposition totale, DTE, pour 6 catégories de sensibilité à la lumière, ©Ezrati, 2002, p.102.....	44
III. 10 Normes en matière de dose minimale avec effet nuisible observable, DMENO pour trois catégories de sensibilité à la lumière, ©Tétreault, 2003, p.142	44
III. 11 Catégories de sensibilité en rapport avec la DMENO, ©Tétreault, 2003, p.142.....	45
III. 12 Localisation de la vitrine « Angola » dans la salle d'exposition, ©MEN 2011.....	45
III. 13 Vitrine « Angola », localisation de l'éclairage LED et position du capteur thermo-hygrométrique dans la vitrine, ©MEN 2011	46
III. 14 Vitrine « Bruits », localisation de l'éclairage LED et position du capteur thermo-hygrométrique dans la vitrine, ©MEN 2011	46
III. 15 Graphique de courbe thermo-hygrométrique concernant la vitrine « Angola », ©HECR Gillioz, 2011.....	47
III. 16 Graphique de variation journalière de température dans la vitrine « Angola », ©HECR Gillioz, 2011.....	47
III. 17 Statistiques des relevés thermo-hygrométriques dans la vitrine « Angola » du MEN, ©HECR Gillioz	48
III. 18 Graphique de courbe thermo-hygrométrique de la vitrine « Bruits », ©HECR Gillioz, 2011	48
III. 19 Graphique de variation journalière de température dans la vitrine « Bruits », ©HECR Gillioz, 2011.....	49
III. 20 Statistiques des relevés thermo-hygrométriques dans la vitrine « Bruits » du MEN, ©HECR Gillioz	49
III. 21 Graphique de courbe thermo-hygrométrique de la vitrine du musée olympique, ©HECR Gillioz, 2011.....	50
III. 22 Graphique de variation journalière de température pour la vitrine du musée olympique, ©HECR Gillioz, 2011	50
III. 23 Statistiques des relevés thermo-hygrométriques dans la vitrine du Musée Olympique de Lausanne, ©HECR Gillioz, 2011.....	51
III. 24 Exemple de vitrine dans la salle « lacustre », les sondes thermo-hygrométriques sont placées en haut de la vitrine ©Laténium, 2011	51
III. 25 Dispositif de l'éclairage LED dans les vitrines « lacustres » du Laténium, le dispositif est composé de barrettes LED et d'une optique en Plexiglas® placé devant les diodes, ©Laténium, 2011.....	51
III. 26 Comparaison de la variation journalière due à l'éclairage entre éclairage à fibres optiques et éclairage LED pour la vitrine d'exposition « du tronc à la poutre », ©HECR Gillioz, 2011	52
III. 27 Comparaison de la variation journalière due à l'éclairage entre éclairage à fibres optiques et éclairage LED pour la vitrine d'exposition « bois de cerf et os », ©HECR Gillioz, 2011	52

III. 28 Comparaison de la variation journalière due à l'éclairage entre éclairage à fibres optiques et éclairage LED pour la vitrine d'exposition « préparation des textiles », ©HECR Gillioz, 2011	52
III. 29 Comparaison de la variation journalière due à l'éclairage entre éclairage à fibres optiques et éclairage LED pour la vitrine d'exposition « vannerie », ©HECR Gillioz, 2011	52
III. 30 Position du transformateur de l'éclairage à fibres optiques dans les vitrines d'exposition du Laténium avant installation de l'éclairage LED, ©Laténium, 2011	53
III. 31 Avantages et désavantages des technologies et émission de lumière « bleue » problématique pour la santé et le potentiel de dommages photochimiques, ©ANSES, 2010 [en ligne]	53
III. 32 Exemple de sources lumineuses en rapport à leur efficacité lumineuse, leur température de couleur (CCT) et leur indice de rendu des couleurs (CRI). On note qu'un meilleur indice de rendu des couleurs implique forcément une efficacité à la baisse, ©Ferrini, 2010, p.39.	54

XI. Annexes

Sensibilité à la lumière	Classification	Exposition annuelle
Objets peu sensibles ou insensibles	8 & +	aucune valeur retenue
Objets sensibles	5 à 7	600 000 lux / heures
Objets très sensibles	4	150 000 lux / heures
Objets fortement sensibles	3	84 000 lux / heures
Objets très fortement sensibles	2	42 000 lux / heures
Objets extrêmement sensibles	1	12 500 lux / heures

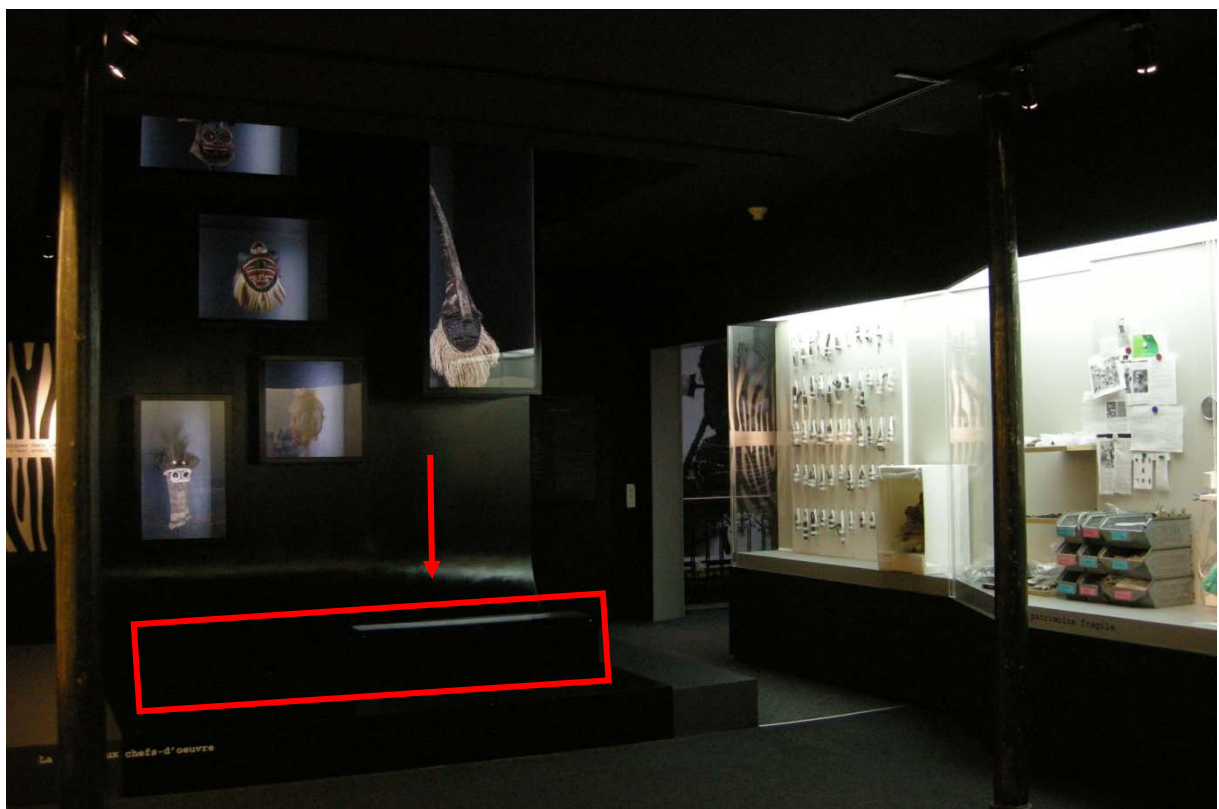
III. 9 Normes en matière de dose d'exposition totale, DTE, pour 6 catégories de sensibilité à la lumière (©Ezrati, 2002, p.102.)

Catégorie	DMENO ^a	Objectifs de préservation ^b		
		1000 ans	100 ans	10 ans
Forte sensibilité ISO 1, 2, 3	ISO 2 : 1,0 Mlx h (million lux heure)	50 lux pour 20 h/an	50 lux pour 25 jours/an 500 lux pour 25 h/an ^c	50 lux pour 250 jours/an 500 lux pour 25 jours/an
Sensibilité moyenne ISO 4, 5, 6	ISO 4 : 10 Mlx h	50 lux pour 25 jours/an 500 lux pour 20 h/an	50 lux pour 250 jours/an 500 lux pour 25 jours/an	340 lux pour 365 jours/an 500 lux pour 250 jours/an
Faible sensibilité ISO 7, 8, et plus	ISO 7 : 300 Mlx h	100 lux pour 365 jours/an 500 lux pour 75 jours/an	1000 lux pour 365 jours/an ^d (500 lux/an pour un objectif de 200 ans)	

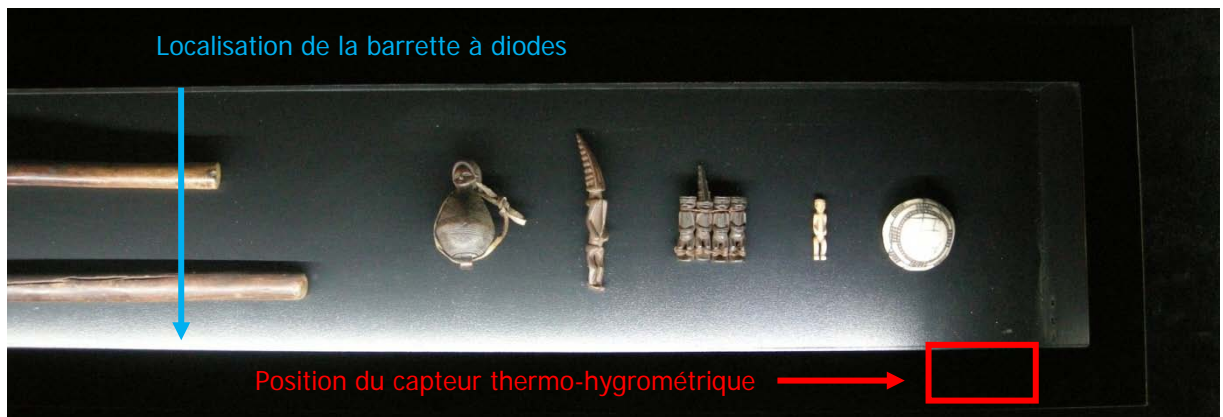
III. 10 Normes en matière de dose minimale avec effet nuisible observable, DMENO pour trois catégories de sensibilité à la lumière (©Tétreault, 2003, p.142)

Catégorie	DMENO	Matériaux (Michalski, 1997, 1999) ^a
Forte sensibilité ISO 1, 2, 3	ISO 2 : 1,0 Mlx h (million lux heure)	<ul style="list-style-type: none"> - La plupart des extraits de plantes, donc la plupart des teintures traditionnelles vives et des laques dans tous les médiums : jaunes, orange, verts, pourpres, bien des rouges, bleus. - Extraits d'insectes, comme la laque (jaune), cochenille (carmin), dans tous les médiums. - La plupart des premières matières colorantes synthétiques comme les anilines, dans tous les médiums. - Maintes matières colorantes synthétiques nouvelles, dans tous les médiums. - La plupart des feutres, y compris les noirs. - La plupart des teintures utilisées pour colorer le papier au cours du XX^e siècle. - La plupart des épreuves en couleurs lorsque « couleurs » fait partie de l'appellation.
Sensibilité moyenne ISO 4, 5, 6	ISO 4 : 10 Mlx h	<ul style="list-style-type: none"> - Quelques extraits de plantes, notamment l'alizarine (rouge de garance) comme teinture pour la laine ou comme laque dans tous les médiums. La sensibilité varie selon le médium et peut être faible, selon la concentration, le substrat et le mordant. - La couleur de la plupart des fourrures et des plumes. - La majorité des épreuves en couleurs lorsque « chrome » fait partie de l'appellation (épreuves cibachromes).
Faible sensibilité ISO 7, 8, et plus	ISO 7 : 300 Mlx h	<ul style="list-style-type: none"> - Palettes d'artiste dites « permanentes » (mélange de peintures réellement permanentes et de peintures à faible sensibilité à la lumière, p. ex., ASTM D4303 Catégorie I; Winsor et Newton AA). - Couleurs structurelles des insectes (avec blocage UV). - Quelques extraits de plantes, notamment l'indigo sur la laine. - Épreuves argentiques en noir et blanc, sur papier non plastifié, et seulement avec blocage UV complet. - Maints pigments modernes de haute qualité mis au point pour usage à l'extérieur, pour les automobiles.

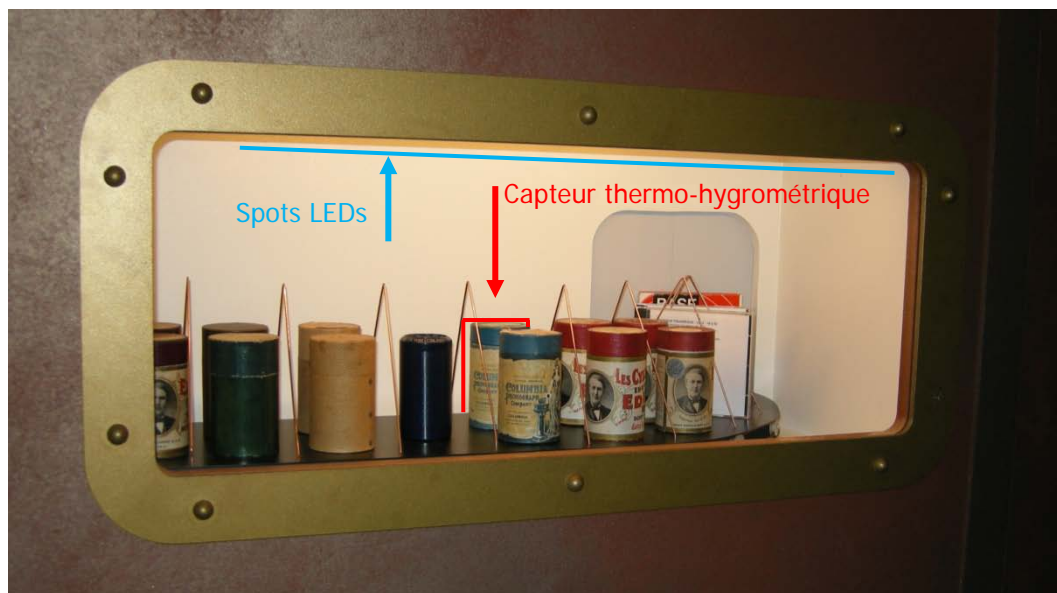
III. 11 Catégories de sensibilité en rapport avec la DMENO (©Tétreault, 2003, p.142.)



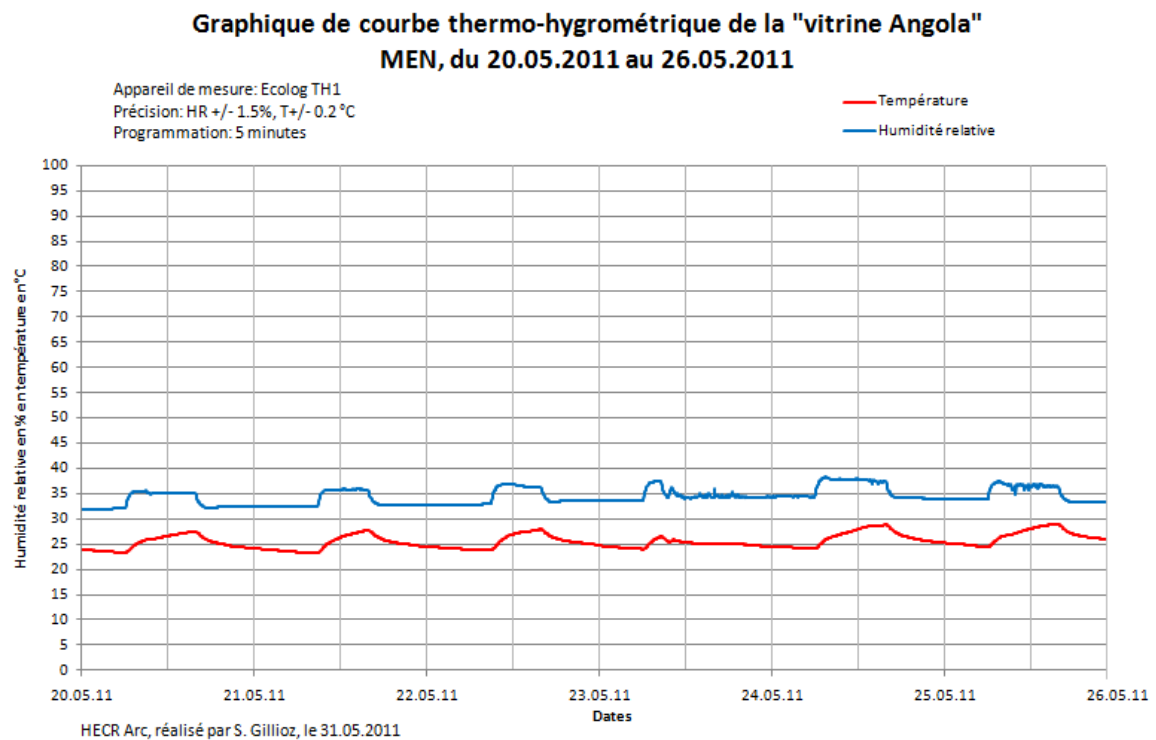
III. 12 Localisation de la vitrine « Angola » dans la salle d'exposition (©MEN 2011)



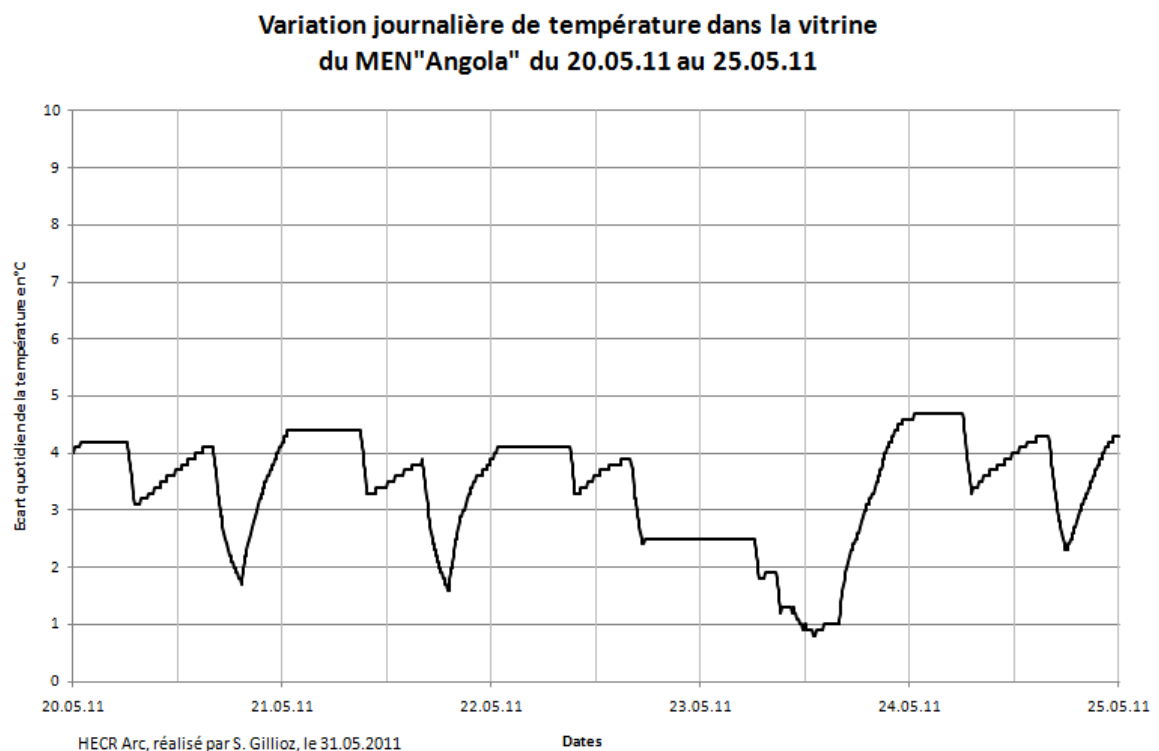
III. 13 Vitrine « Angola », localisation de l'éclairage LED et position du capteur thermo-hygrométrique dans la vitrine (©MEN 2011)



III. 14 Vitrine « Bruits », localisation de l'éclairage LED et position du capteur thermo-hygrométrique dans la vitrine (©MEN 2011)



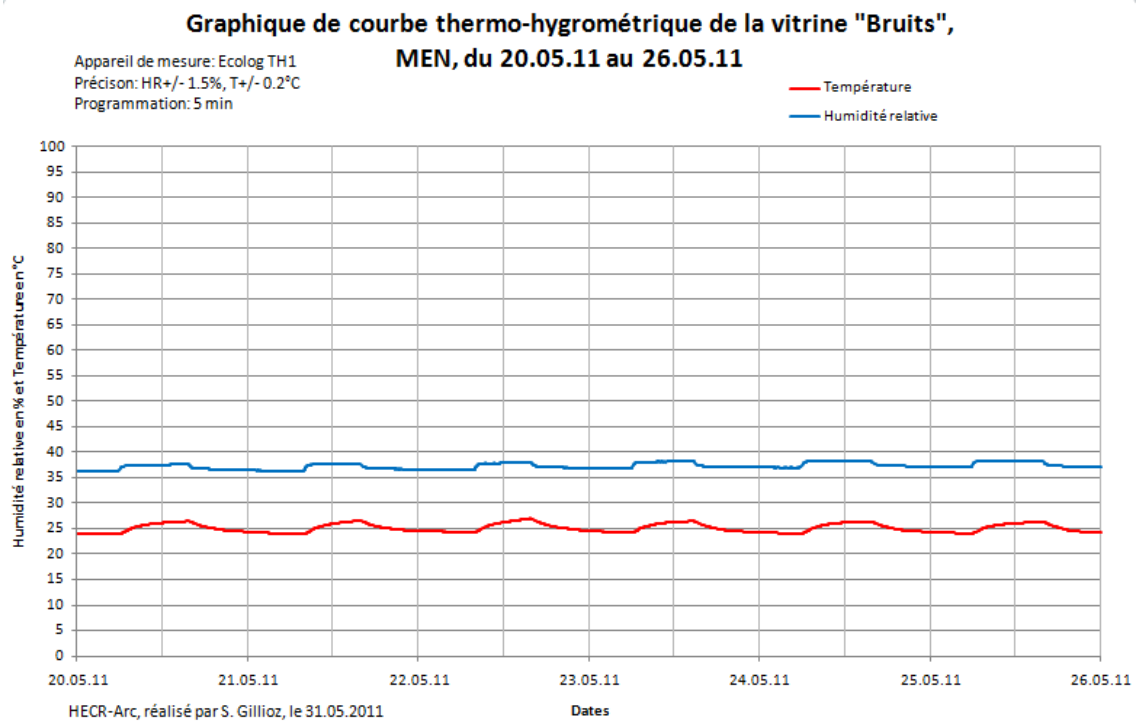
III. 15 Graphique de courbe thermo-hygro-métrique concernant la vitrine « Angola » (©HECR Gillioz, 2011)



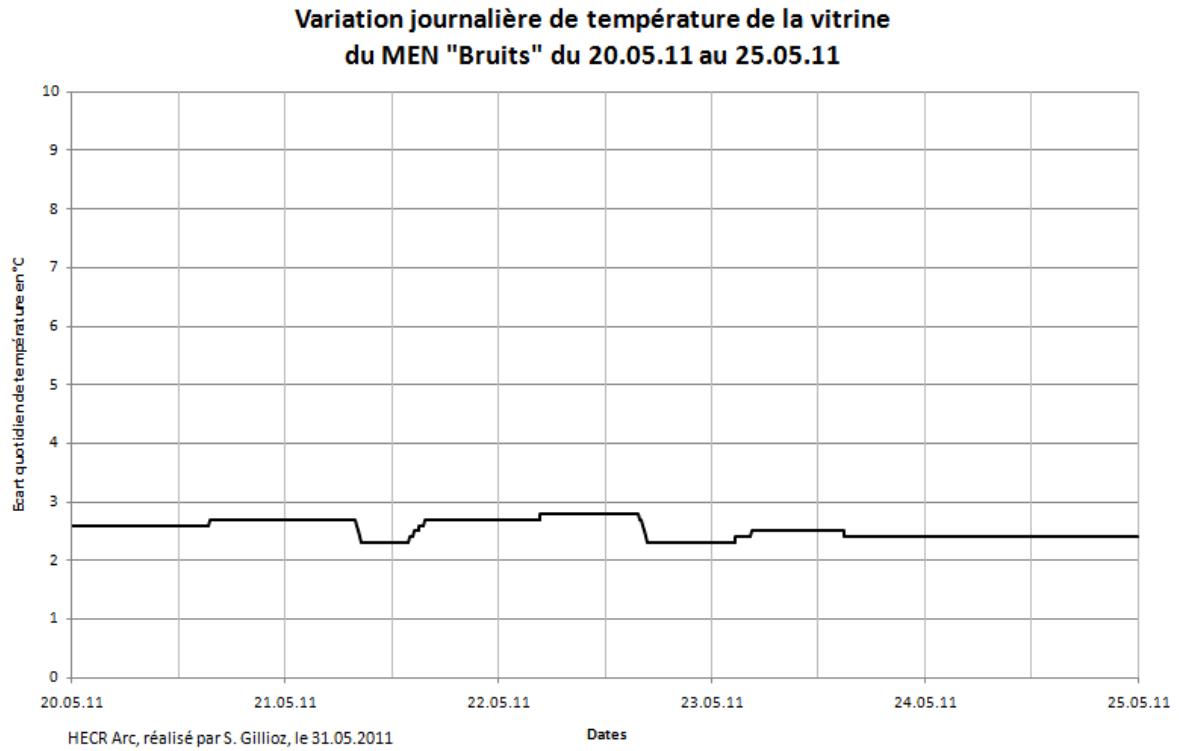
III. 16 Graphique de variation journalière de température dans la vitrine « Angola » (©HECR Gillioz, 2011)

MEN: VITRINE "ANGOLA"				
	Température vitrine Angola du 20.05.11 au 25.05.11	Humidité relative vitrine Angola du 20.05.11 au 25.05.11	Variation journalière de température du 20.05.11 au 25.05.11	Variation journalière d'humidité relative du 20.05.11 au 25.05.11
Maximum	29.0	38.2	4.7	4.3
Moyenne	25.5	34.4	3.4	3.4
Minimum	23.3	31.9	0.8	0.2

III. 17 Statistiques des relevés thermo-hygrométriques dans la vitrine « Angola » du MEN (©HECR Gillioz)



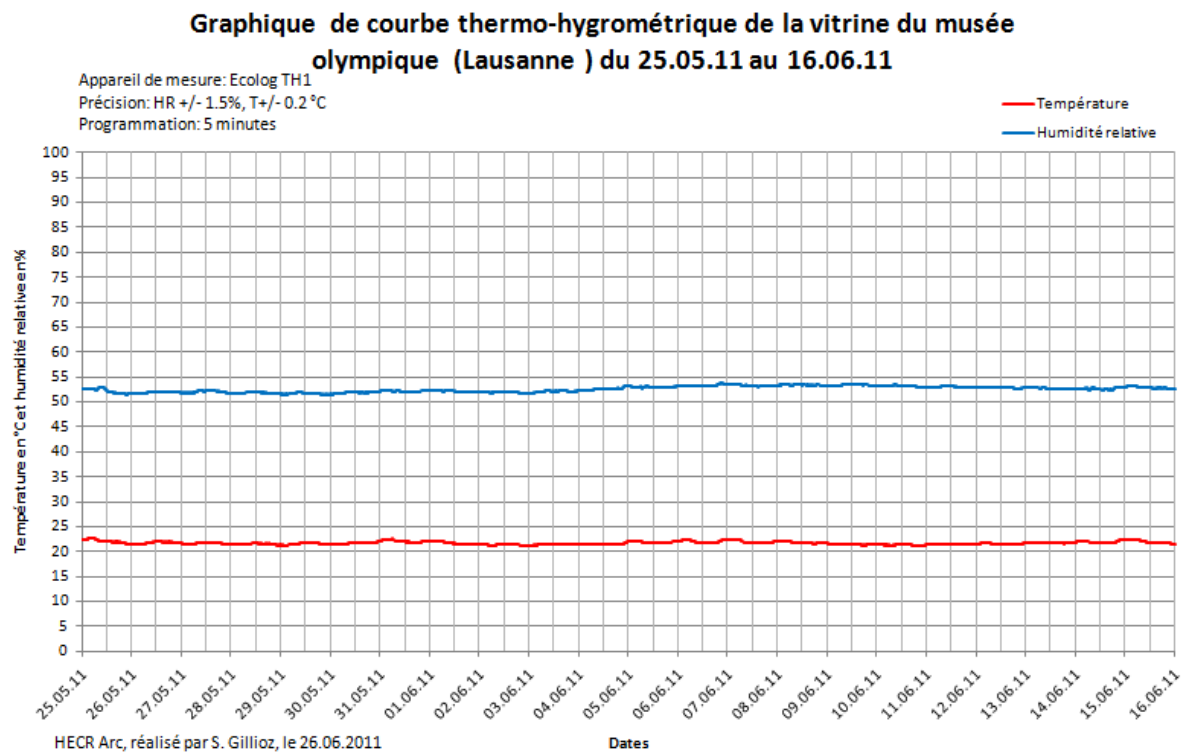
III. 18 Graphique de courbe thermo-hygrométrique de la vitrine « Bruits » (©HECR Gillioz, 2011)



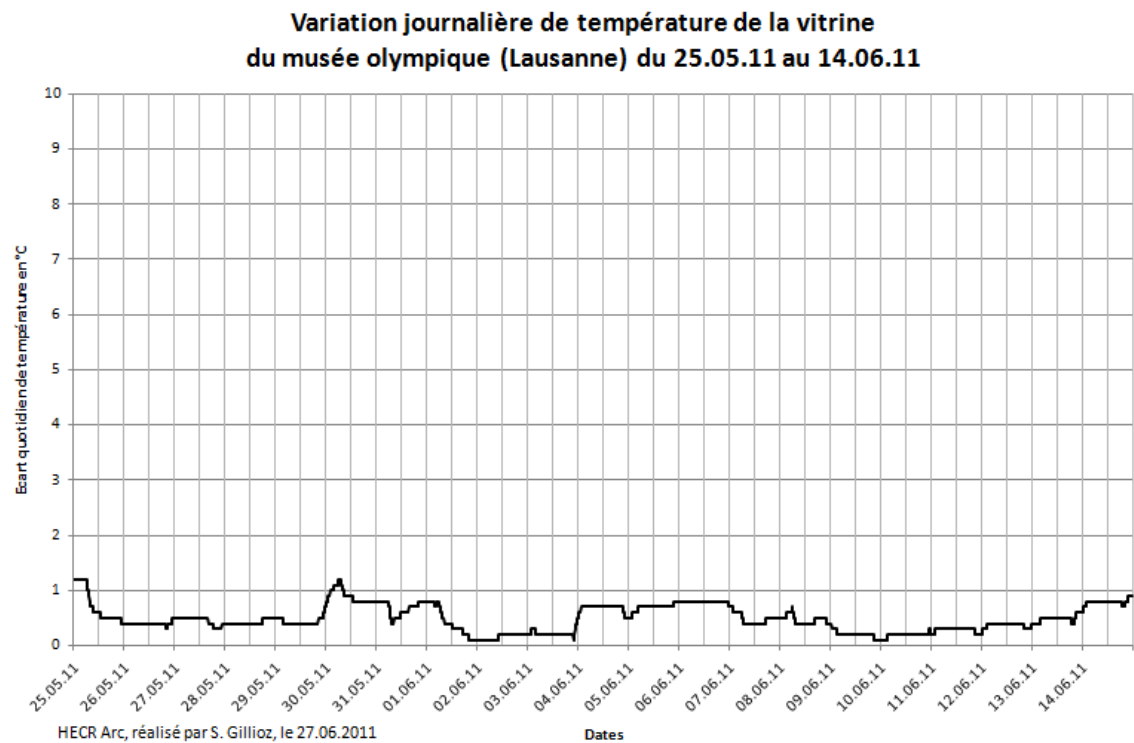
III. 19 Graphique de variation journalière de température dans la vitrine « Bruits » (©HECR Gillioz, 2011)

MEN: VITRINE "BRUITS"				
	Température vitrine Bruits du 20.05.11 au 25.05.11	Humidité relative vitrine Bruits du 20.05.11 au 25.05.11	Variation journalière de température du 20.05.11 au 25.05.11	Variation journalière d'humidité relative du 20.05.11 au 25.05.11
Maximum	27.0	38.4	2.8	1.6
Moyenne	25.1	37.2	2.5	1.4
Minimum	23.9	36.2	2.3	1.2

III. 20 Statistiques des relevés thermo-hygrométriques dans la vitrine « Bruits » du MEN (©HECR Gillioz)



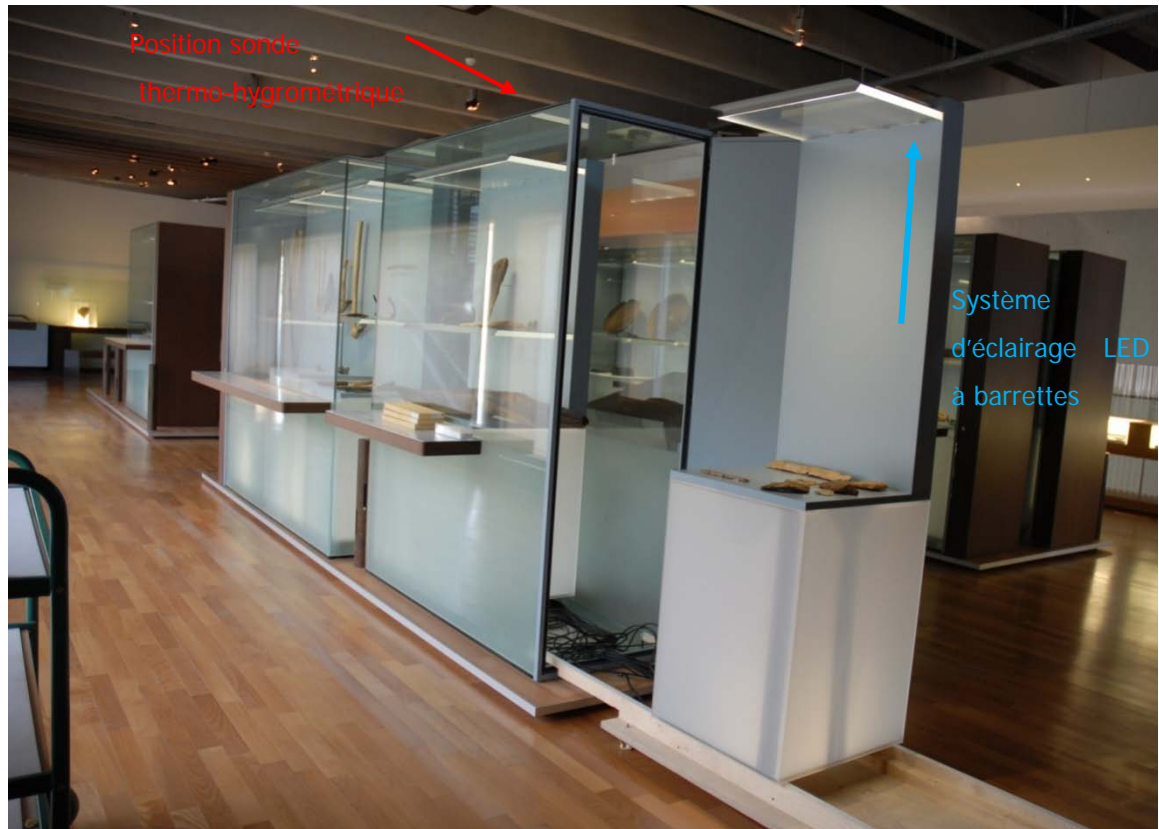
III. 21 Graphique de courbe thermo-hygrométrique de la vitrine du musée olympique (©HECR Gillioz, 2011)



III. 22 Graphique de variation journalière de température pour la vitrine du musée olympique (©HECR Gillioz, 2011)

VITRINE MUSEE OLYMPIQUE				
	Température vitrine Musée Olympique	Humidité relative vitrine Musée olympique	Variation journalière de température dans la vitrine	Variation journalière d'humidité relative dans la vitrine
Maximum	22.7	53.8	1.2	1.5
Moyenne	21.7	52.5	0.5	0.5
Minimum	21.3	51.4	0.1	0.2

III. 23 Statistiques des relevés thermo-hygrométriques dans la vitrine du Musée Olympique de Lausanne (©HECR Gillioz, 2011)



III. 24 Exemple de vitrine dans la salle « lacustre », les sondes thermo-hygrométriques sont placées en haut de la vitrine (©Laténium, 2011)



III. 25 Dispositif de l'éclairage LED dans les vitrines « lacustres » du Laténium, le dispositif est composé de barrettes LED, d'une optique en Plexiglas® placé devant les diodes et d'un support en U métallique (©Laténium, 2011)

DU TRONC A LA POUTRE

FIBRES OPTIQUES			LED		
AVRIL/MAI 2010	Température	Variation journalière de température	AVRIL/MAI 2011	Température	Variation journalière de température
Max	27.1	3	Max	26.9	2.8
Moyenne	23.4	2.2	Moyenne	24.6	1.7
Min	20.2	0.6	Min	20.6	0.4

III. 26 Comparaison de la variation journalière due à l'éclairage entre éclairage à fibres optiques et éclairage LED pour la vitrine d'exposition « du tronc à la poutre » (©HECR Gillioz, 2011)

BOIS DE CERF ET OS

FIBRES OPTIQUES			LED		
AVRIL/MAI 2010	Température	Variation journalière de température	AVRIL/MAI 2011	Température	Variation journalière de température
Max	27.6	3.9	Max	26.3	2.6
Moyenne	23.0	2.3	Moyenne	24.1	1.5
Min	19.9	0.6	Min	21.2	0.4

III. 27 Comparaison de la variation journalière due à l'éclairage entre éclairage à fibres optiques et éclairage LED pour la vitrine d'exposition « bois de cerf et os » (©HECR Gillioz, 2011)

PREPARATION TEXTILES

FIBRES OPTIQUES			LED		
AVRIL/MAI 2010	Température	Variation journalière de température	AVRIL/MAI 2011	Température	Variation journalière
Max	27	3.2	Max	25.9	1.2
Moyenne	23.3	2.4	Min	21.6	0.8
Min	20.4	0.6	Moyenne	24.2	0.4

III. 28 Comparaison de la variation journalière due à l'éclairage entre éclairage à fibres optiques et éclairage LED pour la vitrine d'exposition « préparation des textiles » (©HECR Gillioz, 2011)

VANNERIE

FIBRES OPTIQUES			LED		
AVRIL/MAI 2010	Température	Variation journalière de température	AVRIL/MAI 2011	Température	Variation journalière de température
Max	26.7	3	Max	25.6	1.5
Moyenne	23.1	2.3	Min	21.3	0.8
Min	20	0.5	Moyenne	23.9	0.3

III. 29 Comparaison de la variation journalière due à l'éclairage entre éclairage à fibres optiques et éclairage LED pour la vitrine d'exposition « vannerie » (©HECR Gillioz, 2011)



III. 30 Position du transformateur de l'éclairage à fibres optiques dans les vitrines d'exposition du Laténium avant installation de l'éclairage LED (©Laténium, 2011)

	Avantages	Inconvénients	Émission de « lumière bleue »
LED bleue + phosphore(s)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bonne efficacité lumineuse ■ Technologie maîtrisée ■ Différentes Températures de couleur (Teintes chaudes ou froides) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Variations de teintes très limitées ■ Tris nécessaires pour obtenir un lot de même couleur à la sortie de la chaîne de fabrication ■ Phénomène de « halo » coloré 	Oui, diffuse
LED UV + RGB	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bonne uniformité de couleur ■ Large gamme de blancs ■ Bon indice de rendu de couleur (IRC de 70-90) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Efficacité lumineuse moindre ■ Faible puissances ■ Solarisation UV du boîtier 	Non
LED RGB(A)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Contrôle dynamique des couleurs ■ Possibilité de générer des millions de couleurs et teintes 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Électronique de contrôle plus complexe ■ Variations de couleurs dues à l'échauffement ■ Nécessite d'homogénéiser le flux ■ Mauvais Indice de Rendu de Couleurs 	Oui, directionnelle et intense

III. 31 Avantages et désavantages des technologies et émission de lumière « bleue » problématique pour la santé et le potentiel de dommages photochimiques (©ANSES, 2010 [en ligne])

Source	Efficacité [lm/W]	CCT [K]	CRI
Lampe à incandescence 40–60–75 W	12–14	2700	100
Lampe à incandescence 100 W	14–15		
Lampe halogène 50 W/12 V	25	3200	100
Tubes fluorescents	90 (100)	4000 (3000)	60 (80)
Flat LED Lighting (KDT)	40 (30)	5000 (3000)	70 (90)
LED PAR 20 et 30 (GE)	28–34	2700–3000	82
E-Core LED (Toshiba)	50–90	4000 (2700)	70 (80)
Parathom Classic (Osram)	40–60	4000 (2700)	70 (80)
EverLED (Panasonic)	80	4000 (2700)	70 (80)
Master LED (Philips)	50 (40–50)	4200 (2700)	80
Fortimo LED (Philips)	75	3000–4000	80

III. 32 Exemple de sources lumineuses en rapport à leur efficacité lumineuse, leur température de couleur (CCT) et leur indice de rendu des couleurs (CRI). On note qu'un meilleur indice de rendu des couleurs implique forcément une efficacité à la baisse (©Ferrini, 2010, p.39.)